



**UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR**

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

**SIMULACIÓN DE UN CHOQUE
LATERAL CONTRA BARRERA
DEFORMABLE Y CONTRA UN POSTE**

PROYECTO FIN DE CARRERA

Ingeniería Técnica Industrial: Mecánica

Autor:

D. ALBERTO PAVÓN ZORI

Tutora:

Dra. D^a. BEATRIZ LÓPEZ BOADA

OCTUBRE 2011

ÍNDICE

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | INTRODUCCIÓN..... | 10 |
| 1.1. | Objetivo | 12 |
| 1.2. | Estructura del proyecto..... | 13 |
| 2 | SEGURIDAD ACTIVA | 15 |
| 2.1. | ABS..... | 15 |
| 2.2. | BAS | 17 |
| 2.3. | El EDB | 17 |
| 2.4. | Control de tracción TCS..... | 18 |
| 2.5. | Control de estabilidad ESP | 18 |
| 2.6. | Adaptive Cruise Control | 21 |
| 2.7. | Sistemas pre-colisión..... | 22 |
| 2.8. | Sistemas de alumbrado..... | 22 |
| 3 | SEGURIDAD PASIVA | 24 |
| 3.1. | Carrocería | 24 |
| 3.2. | El fenómeno de colisión | 25 |
| 3.3. | Zonas de absorción de impacto | 26 |
| 3.4. | Deformación programada | 26 |
| 3.5. | El habitáculo de seguridad | 29 |
| 3.6. | El cinturón de seguridad | 31 |
| 3.7. | El airbag | 34 |
| 3.8. | Los reposacabezas | 36 |
| 4 | ENSAYOS DE CHOQUE..... | 37 |
| 4.1. | Historia..... | 39 |
| 4.1.1. | Historia del <i>dummy</i> | 40 |
| 4.2. | Entidades que realizan los ensayos de choque..... | 43 |
| 4.2.1. | Fabricantes | 43 |
| 4.2.2. | Organismos de homologación | 43 |
| 4.2.3. | Organizaciones privadas | 44 |

| | | |
|-------------|---|-----------|
| 4.3. | Tipos de ensayos de choque | 45 |
| 4.3.1. | Ensayo de impacto frontal..... | 45 |
| 4.3.2. | Ensayo de impacto lateral | 47 |
| 4.3.2.1. | Ensayo de impacto lateral contra otro vehículo | 48 |
| 4.3.2.2. | Ensayo de impacto lateral contra un poste | 49 |
| 4.3.3. | Ensayo de impacto trasero | 51 |
| 4.3.4. | Ensayo de vuelco..... | 51 |
| 4.3.5. | Atropello a peatones | 52 |
| 5 | EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS | 53 |
| 5.1. | Principios básicos del MEF | 54 |
| 5.2. | Problemas no lineales..... | 55 |
| 5.2.1. | Causas relativas al material | 55 |
| 5.2.2. | Causas geométricas | 56 |
| 5.2.3. | Causas relacionada con los elementos | 57 |
| 5.3. | LS – DYNA..... | 57 |
| 6 | PROTOCOLO DE ENSAYO DE IMPACTO LATERAL CONTRA UN POSTE | 62 |
| 6.1. | Preparación del vehículo..... | 62 |
| 6.2. | <i>Dummy</i> | 63 |
| 6.3. | Condiciones de ensayo..... | 64 |
| 6.4. | Cálculo de los criterios de lesiones | 64 |
| 6.4.1. | Cabeza | 64 |
| 6.4.2. | Costillas | 65 |
| 6.4.3. | Abdomen | 65 |
| 6.4.4. | Pelvis | 65 |
| 6.4.5. | Sínfisis púbica | 65 |
| 7 | MODELOS DE LA SIMULACIÓN..... | 66 |
| 7.1. | Coche..... | 66 |
| 7.1.1. | Geometría | 67 |
| 7.1.2. | Materiales | 69 |
| 7.1.3. | Gravedad..... | 70 |
| 7.1.4. | Acelerómetros..... | 71 |
| 7.1.5. | Muelles..... | 71 |
| 7.1.6. | Contactos | 73 |

| | | |
|-------------|---|------------|
| 7.2. | Bogie | 73 |
| 7.2.1. | Geometría | 74 |
| 7.2.2. | Materiales | 74 |
| 7.2.3. | Velocidad inicial | 75 |
| 7.2.4. | Gravedad..... | 76 |
| 7.2.5. | Acelerómetros..... | 76 |
| 7.2.6. | Contactos | 76 |
| 7.3. | Poste | 77 |
| 7.3.1. | Geometría | 78 |
| 7.3.2. | Materiales | 71 |
| 7.3.3. | Velocidad inicial | 78 |
| 7.3.4. | Gravedad..... | 78 |
| 7.3.5. | Contactos | 79 |
| 8 | RESULTADOS..... | 80 |
| 8.1. | Impacto lateral de un vehículo contra otro vehículo | 80 |
| 8.2. | Impacto lateral contra un poste..... | 87 |
| 8.3. | Comparación entre ambos ensayos..... | 93 |
| 9 | CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS..... | 97 |
| 9.1. | Conclusiones..... | 97 |
| 9.2. | Trabajos futuros | 100 |
| 10 | REFERENCIAS | 102 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. 1 Automóviles en España..... | 11 |
| Figura 1. 2 Fallecidos en accidentes de tráfico..... | 11 |
| Figura 1. 3 Accidentes contra árbol o poste..... | 12 |
| Figura 2. 1 Sistema completo de ABS..... | 16 |
| Figura 2. 2 Trazada de un vehículo con y sin subviraje..... | 19 |
| Figura 2. 3 Trazada de un vehículo con y sin sobreviraje..... | 19 |
| Figura 2. 4 Funcionamiento del ESP..... | 20 |
| Figura 2. 5 Funcionamiento del ACC si no detecta ningún coche..... | 21 |
| Figura 2. 6 Funcionamiento del ACC si detecta algún obstáculo..... | 21 |
| Figura 2. 7 Funcionamiento del sistema adaptativo de luces..... | 23 |
| Figura 2. 8 Visualización a través de la cámara infrarroja en el frontal del vehículo..... | 23 |
| Figura 3. 1 Larguero delantero en forma de horquilla del Renault Laguna..... | 27 |
| Figura 3. 2 Puntos fusibles de un larguero para su deformación..... | 28 |
| Figura 3. 3 Estado de un larguero con puntos fusibles para la deformación tras ser sometido a un impacto..... | 28 |
| Figura 3. 4 Refuerzos laterales de un Volvo S40..... | 29 |
| Figura 3. 5 Estructura de la carrocería de un Audi A5..... | 30 |
| Figura 3. 6 Tipos de columnas de dirección..... | 31 |
| Figura 3. 7 Ejemplo de cinturón de dos puntos..... | 32 |
| Figura 3. 8 Ejemplo de cinturón de tres puntos..... | 32 |
| Figura 3. 1 Funcionamiento del pretensor del cinturón de seguridad..... | 33 |

| | |
|--|----|
| Figura 3. 10 Ejemplos de airbag de conductor y acompañante..... | 35 |
| Figura 3. 11 Airbag lateral y de cortina..... | 35 |
| Figura 3. 12 Funcionamiento de un reposacabezas activo..... | 36 |
| Figura 4.1 Ensayo simulado por ordenador..... | 38 |
| Figura 4.2 Estado de un coche tras sufrir un impacto frontal..... | 39 |
| Figura 4.3 <i>Dummy</i> VIP-50..... | 41 |
| Figura 4.4 <i>Dummy Hybrid III</i> | 42 |
| Figura 4.5 Ensayo frontal según EuroNCAP..... | 46 |
| Figura 4.6 Estado final de un vehículo tras sufrir un ensayo frontal..... | 47 |
| Figura 4.7 Condiciones ensayo lateral según EuroNCAP..... | 48 |
| Figura 4.8 Estado final de un coche tras sufrir un ensayo lateral..... | 49 |
| Figura 4.9 Esquema de un impacto lateral contra un poste..... | 50 |
| Figura 4.10 Estado de un coche tras sufrir un ensayo contra un poste..... | 50 |
| Figura 4.11 Estado final de un coche tras un impacto trasero..... | 51 |
| Figura 4.12 Ensayo de atropello..... | 52 |
| Figura 5. 1 Material elástico (izda.) y material con comportamiento plástico (dcha.)..... | 56 |
| Figura 5. 2 Plastificación: Comportamiento no lineal de la estructura..... | 56 |
| Figura 5. 3 Simulación de un impacto frontal con LS-DYNA..... | 58 |
| Figura 5. 4 Simulación de un impacto lateral con LS-DYNA..... | 58 |
| Figura 5. 5 Airbag modelado en LS-PrePost..... | 59 |
| Figura 5. 6 Cinturón de seguridad modelado en LS-PrePost..... | 60 |
| Figura 5. 7 <i>Dummy</i> modelado en LS-PrePost..... | 60 |
| Figura 5. 8 Ejemplo de gráfica visualizada en LS-PrePost..... | 61 |
| Figura 7. 1 Modelo del vehículo..... | 67 |
| Figura 7. 2 Vista de los elementos estructurales del modelo..... | 68 |
| Figura 7. 3 Asientos del modelo Ford Taurus..... | 69 |
| Figura 7. 4 Posición del acelerómetro del vehículo..... | 71 |

| | |
|--|-----|
| Figura 7.5 Detalle del muelle entre las puertas del modelo. | 72 |
| Figura 7. 6 Modelo del <i>bogie</i> . | 73 |
| Figura 7. 7 Barrera Deformable. | 74 |
| Figura 7. 8 Acelerómetros del <i>bogie</i> . | 76 |
| Figura 7. 9 Modelo del coche con <i>bogie</i> . | 77 |
| Figura 7. 10 Poste simulado por ordenador. | 77 |
| Figura 7. 11 Modelo del coche con poste. | 79 |
| Figura 8. 1 Gráfica de aceleración resultante en el coche en el ensayo contra otro coche. | 84 |
| Figura 8. 2 Compresión del muelle. Impacto contra bogie. | 85 |
| Figura 8. 3 Energía cinética en el vehículo. Impacto contra bogie. | 86 |
| Figura 8. 4 Energía interna en el vehículo. Impacto contra bogie. | 86 |
| Figura 8. 5 Gráfica de aceleración resultante en el coche en el ensayo contra un poste. | 90 |
| Figura 8. 6 Compresión del muelle. Impacto contra poste. | 91 |
| Figura 8. 7 Energía cinética en el vehículo. Impacto contra poste. | 92 |
| Figura 8. 8 Energía interna en el vehículo. Impacto contra poste. | 92 |
| Figura 9. 1 Vista inferior de la comparativa entre el modelo real y el simulado. | 99 |
| Figura 9. 2 Vista lateral de la comparativa entre el modelo real y el simulado. | 100 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 6. 1 Instrumentación del <i>Dummy</i> | 63 |
| Tabla 7. 1 Criterio de Unidades..... | 66 |
| Tabla 7. 2 Propiedades del material <i>PIECEWISE LINEAR PLASTICITY</i> empleado en el vehículo..... | 69 |
| Tabla 7. 3 Propiedades del material <i>PIECEWISE LINEAR PLASTICITY</i> empleado en el bastidor de los asientos..... | 70 |
| Tabla 7. 4 Propiedades del material <i>RIGID</i> empleado en el chasis del bogie | 75 |
| Tabla 7. 5 Propiedades de los materiales <i>RIGID</i> y <i>HONEYCOMB</i> empleados en la barrera..... | 75 |
| Tabla 7. 6 Propiedades del material <i>RIGID</i> empleado en el poste..... | 78 |
| Tabla 8. 1 Vista isométrica y cenital del exterior del vehículo en el ensayo lateral contra otro vehículo..... | 81 |
| Tabla 8. 2 Vista isométrica y cenital del exterior del vehículo en el ensayo lateral contra un poste..... | 87 |
| Tabla 8. 3 Comparativa entre ambos ensayos..... | 93 |

1 INTRODUCCIÓN

Debido a la alta tasa de siniestralidad de las carreteras, asociaciones internacionales como EuroNCAP o NCAC, autoridades nacionales como la DGT o los propios fabricantes de automóviles invierten cada vez más recursos en investigación con el objetivo de mantener la tendencia a disminuir de los accidentes de los últimos años.

De esta forma se puede apreciar que pese al aumento constante del parque automovilístico en los últimos años así como del número de desplazamientos por carretera y por zonas urbanas, el número de accidentes y el de víctimas mortales han ido disminuyendo de manera notable. En las figuras 1.1 y 1.2 se muestran estos datos obtenidos de los informes que publica anualmente la DGT sobre accidentes mortales [1] [2].

Este logro se debe en parte gracias a las autoridades que con sus campañas y su control a los conductores han logrado concienciar de esta situación a la población. Por otro lado no se debe olvidar la labor llevada a cabo por asociaciones y plataformas de conductores, las cuales han realizado una gran labor de investigación sobre las formas posibles de disminuir los accidentes o la gravedad de los mismos. Finalmente, han sido los propios fabricantes los que gracias a novedosos avances en materia de seguridad, tanto activa como pasiva, han logrado disminuir el número de accidentes mortales en las carreteras.

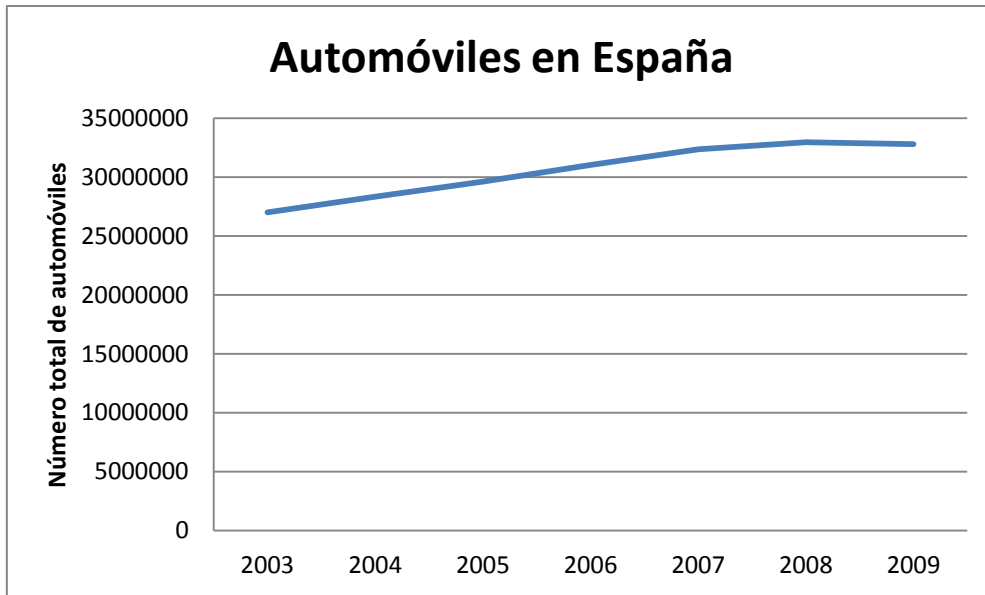


Figura 1. 1 Automóviles en España.

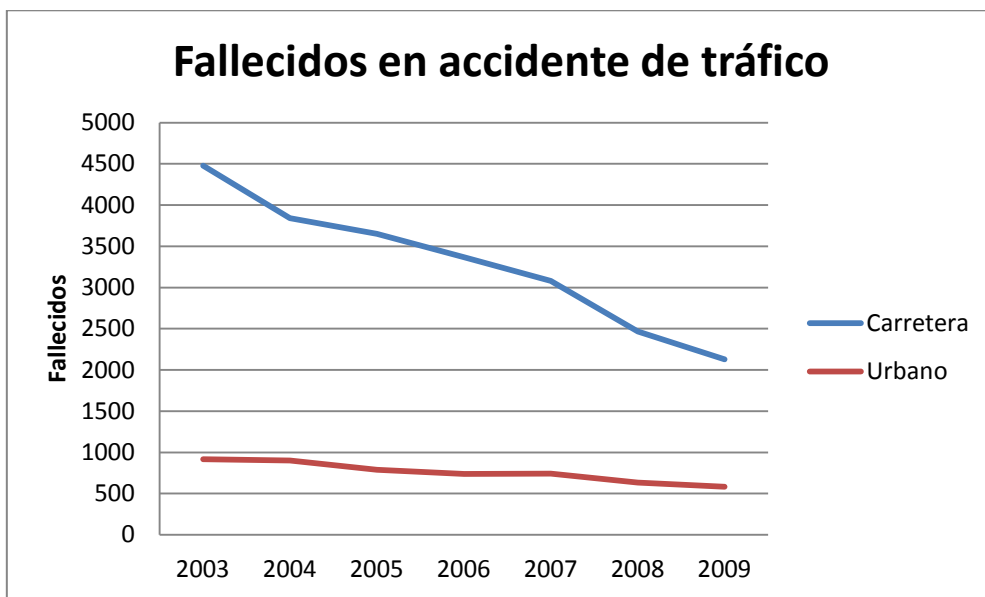


Figura 1. 2 Fallecidos en accidentes de tráfico.

En este proyecto se analizarán los accidentes en los cuales el vehículo se sale de la vía y acaba impactando de forma lateral contra un poste o árbol. En el año 2009 se produjeron un total de 1563 accidentes de este tipo, dejando un total de 135 fallecidos, 464 heridos graves y 1658 heridos leves. En la figura 1.3 se puede apreciar cómo se distribuye las víctimas en función de su gravedad [2].

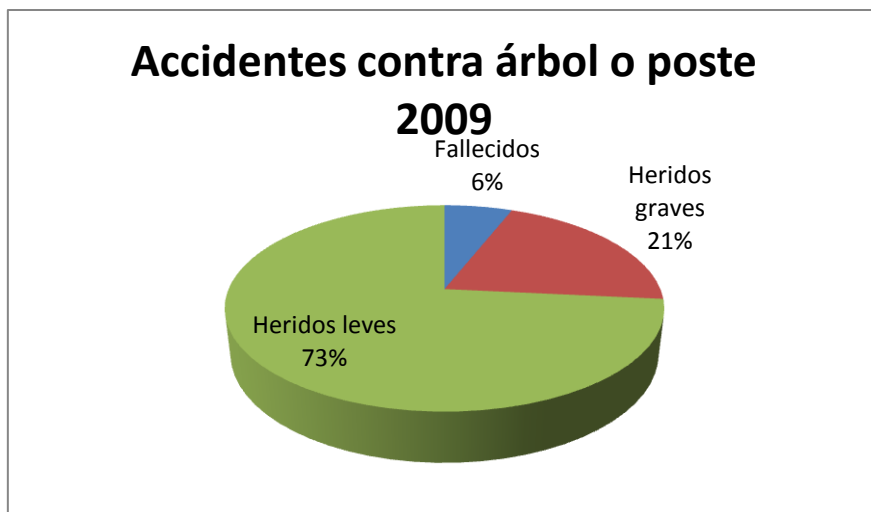


Figura 1. 3 Accidentes contra árbol o poste.

El proyecto analizará la gravedad de este tipo de accidentes gracias a la simulación por ordenador. Antes se ha explicado que la tendencia a disminuir de las víctimas mortales en accidentes de tráfico es gracias, entre otros, a los nuevos sistemas que implantan los fabricantes. Sin embargo esto no sería posible sin los avances en el campo de la informática y las posibilidades del software de diseño asistido por computador.

En este sentido, ha sido de suma importancia el papel llevado a cabo por el software de simulación de impactos LS-Dyna, el cual fue desarrollado por *Livermore Software Technology Corporation*. Gracias a este software los fabricantes e investigadores pueden conocer con un alto grado de fidelidad las consecuencias de un determinado tipo de accidente sobre un automóvil, y compararlo después con una nueva disposición de ciertos elementos, o con un nuevo material sin tener que construir y destruir un nuevo automóvil cada vez.

En definitiva, este tipo de software no puede reemplazar por completo a los ensayos reales, que son los que ofrecen unos resultados completamente verídicos sobre las consecuencias de los accidentes, las deformaciones producidas y los daños causados sobre los *dummies*, pero sí que constituye un gran ahorro de tiempo y dinero.

1.1. Objetivo

El objetivo de este proyecto es analizar el impacto lateral de un vehículo contra un poste mediante el uso del programa LS-Dyna. En concreto se va a simular el ensayo con las condiciones iniciales que indica el

protocolo de EuroNCAP y se van a obtener los resultados de deformación y aceleración sufrida por el coche.

Por otro lado también se van a comparar los resultados con los obtenidos por otro tipo de ensayo, esta vez el impacto lateral contra otro vehículo. En este ensayo también se seguirán las condiciones iniciales marcadas por el reglamento 95 de la Comisión Económica Europea y se obtendrán resultados relativos a la aceleración sufrida y a la deformación producida.

Por lo tanto, el objetivo del proyecto es la simulación del ensayo, no el modelado de los archivos del coche, el poste o la barrera deformable móvil que intervienen. Ésta es la razón de que estos archivos se obtengan directamente de la página web de la NCAC [3].

NCAC son las siglas de *National Crash Analysis Center*, y es un grupo de investigación norteamericano resultado de la colaboración de la *Federal Highway Administration* (FHWA), la *National Highway Traffic Safety Administration* (NHTSA) y la Universidad George Washington. Este grupo creado en 1992 ha realizado, entre otras cosas, el modelado mediante el programa LS-PrePost de numerosos modelos de coches y camiones, así como la simulación de determinados ensayos de choque.

1.2. Estructura del proyecto

En el capítulo dos, ELEMENTOS DE SEGURIDAD ACTIVA, se tratan los sistemas de seguridad activa, que son aquellos que tienen como función reducir la probabilidad de que un accidente llegue a ocurrir. Es el caso de sistemas como el ABS, el ESP, sistemas de suspensión, etc.

El capítulo tres, ELEMENTOS DE SEGURIDAD PASIVA, trata sobre los sistemas de seguridad pasiva, que son los que, en caso de que se llegue a producir un accidente, reducen las consecuencias del mismo sobre los ocupantes o los demás conductores o peatones. Dentro de estos sistemas se encuentran el airbag, el cinturón de seguridad, las estructuras de deformación programada o el habitáculo de seguridad entre otros.

En el capítulo cuatro, ENSAYOS DE CHOQUE, se enumeran los distintos ensayos de choque que se llevan a cabo en la actualidad, las empresas que los realizan y la evolución de los mismos.

En el capítulo cinco, EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS, se hace una introducción al método de los elementos finitos en el cual se basan los programas empleados en la simulación, Ls-PrePost y LS-Dyna. También se tratan la historia del software y los algoritmos que siguen estos programas.

En el capítulo seis, PROTOCOLO DE ENSAYO DE IMPACTO LATERAL CONTRA UN POSTE, se trata el proceso de preparación que sigue la EuroNCAP para realizar en los vehículos los ensayos de choque lateral de un vehículo contra un poste. También se explican las mediciones que es necesario realizar y los parámetros a determinar

En el capítulo siete, MODELOS DE LA SIMULACIÓN, se describen los principales aspectos de los modelos descargados de la página de la NCAC (geometría, materiales, gravedad, etc.) así como el proceso de implementación en la simulación, los contactos utilizados o la velocidad inicial impuesta.

En el capítulo ocho, RESULTADOS, se comentan los resultados obtenidos en las simulaciones, incluyendo las secuencias de choque de ambos casos. También se hace una comparativa entre el choque lateral contra otro vehículo y el choque lateral contra un poste.

En el capítulo nueve, CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS, se resumen las conclusiones obtenidas tras analizar los resultados obtenidos. Por otro lado, se explican los posibles proyectos a los que puede servir el presente como baso o apoyo.

2 SEGURIDAD **ACTIVA**

Se entiende por sistemas de seguridad activa todos aquellos sistemas que incorpora un vehículo y que tienen como finalidad evitar un accidente.

Los más comunes son aquellos que intervienen en la conducción del vehículo. Tal es el caso del ABS, que interviene en la frenada, el control de tracción, que interviene en las aceleraciones o el ESP, capaz de modificar el comportamiento del vehículo en los giros.

Sin embargo, gracias a los nuevos avances en tecnología, se pueden encontrar sistemas de seguridad activa que no intervienen en la conducción. Así, están los controles de presión de los neumáticos o los faros adaptativos.

A continuación se explican los principales sistemas de seguridad activa.

2.1. ABS

El ABS es un sistema de seguridad activa que interviene en el proceso de frenado. Sus siglas vienen de *Antilock Brake System*. Su objetivo es evitar el bloqueo de las ruedas y conseguir así una mayor eficacia de frenado sin perder el control del vehículo [4].

En el caso de una frenada brusca, es fácil llegar a bloquear las ruedas del vehículo. Cuando esto ocurre se pierde eficacia en la frenada ya que el

neumático empieza a deslizarse. Además el riesgo de colisión que conlleva es mayor, ya que el vehículo se hace ingobernable bajo esta circunstancia.

El funcionamiento básico del ABS consiste en regular la presión de conducto del líquido de frenos para controlar de esa manera la presión que están ejerciendo las pastillas contra el disco. Para ello toma datos constantemente de la velocidad angular de las ruedas y cuando detecta que una rueda ha bloqueado o está a punto de hacerlo, entra en acción y regula la presión de frenado.

En la figura 2.1 se muestra un esquema de un sistema completo de ABS.

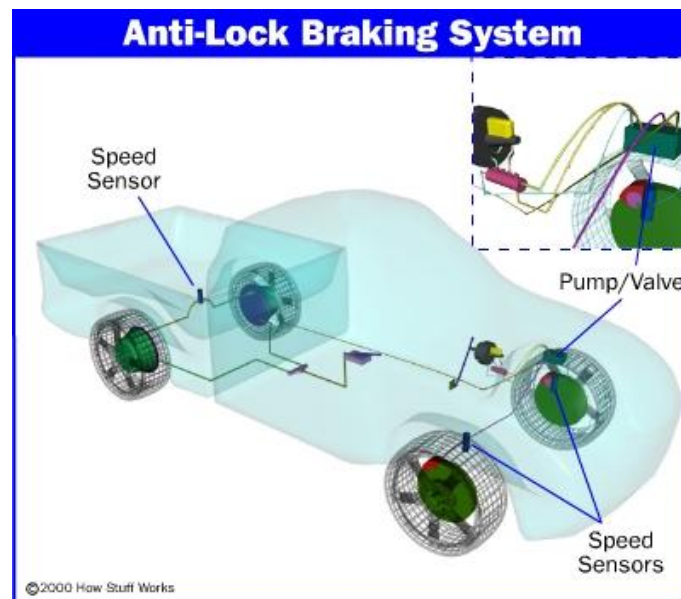


Figura 2. 1 Sistema completo de ABS.

El ABS empezó siendo desarrollado por Bosch en la década de 1930. Bosch patentó la idea, pero no se llegaron a obtener unos buenos resultados de eficacia, debido a que todavía no se disponía de los circuitos integrados necesarios para hacer los cálculos que necesita hacer este sistema. Fue por eso que el proyecto se detuvo hasta 1966, año en el que Tedix GmbH, empresa perteneciente a Bosch, comienza a investigar nuevos sistemas de ABS, estos con reguladores electrónicos. Esta fue la primera vez que se consiguieron resultados positivos de eficacia de frenado.

En 1970 se consigue diseñar un sistema de ABS eficaz y con posibilidades de ser equipado en vehículos convencionales de la marca Daimler-Benz. De esta forma, aparece el ABS 1, un sistema con más de 1000 componentes.

Como ya se ha explicado, el ABS tiene como función principal evitar el bloqueo de las ruedas del vehículo en el caso de una frenada brusca. Esta situación se produce en el caso de que la fuerza de frenada sea mayor que la fuerza adherente disponible. Esta circunstancia es detectada por el coche a través de unos sensores de velocidad angular situados en las ruedas. Cuando estos sensores detectan que se ha bloqueado una rueda, se activan las electroválvulas del sistema, que son las encargadas de regular la presión que el líquido de frenos ejerce sobre la pastilla.

Así, cuando se bloquea una rueda el sistema disminuye la presión de frenado, independientemente de la presión que ejerza el conductor, hasta que la rueda vuelve a girar libremente, y es entonces cuando se vuelve a aplicar presión sobre la pastilla.

Este proceso se repite constantemente hasta que el conductor deja de ejercer presión sobre el freno o hasta que las condiciones hacen que sea posible frenar sin bloquear la rueda.

2.2. BAS

El BAS o *Brake Assist System*, es un sistema de seguridad activa que actúa sobre el sistema de frenado en combinación con el ABS.

Como conclusión de diversos estudios se obtuvo que ante una situación que requiera una frenada de emergencia, el conductor no ejerce la presión necesaria sobre el pedal del freno para obtener la mayor eficacia de frenada. Ante dicha situación el conductor pisa el pedal con mucha rapidez, pero en seguida baja la presión ejercida, hasta que el impacto es inminente, momento en el cual vuelve a aumentar la presión sobre el pedal [6].

Este sistema, desarrollado por Mercedes-Benz en 1996, es capaz de detectar esta situación de emergencia por la velocidad y la presión inicial con la que el conductor pisa el pedal de freno en un primer instante. Una vez detectada esta situación, el sistema mantiene constante la presión sobre el sistema de frenos, aunque la presión que el conductor está ejerciendo sobre el pedal sea menor. De esta forma se aumenta de forma significativa la eficacia de la frenada.

2.3. EI EDB

Como ya se ha explicado, el ABS actúa en caso de que la fuerza de frenado supere a la fuerza de adherencia disponible en cada rueda. Ésta fuerza adherente disponible, depende fundamentalmente del coeficiente de

rozamiento entre el neumático y el suelo y de la fuerza normal que se ejerza sobre este.

Dicho de otro modo, la fuerza adherente depende de la carga vertical del coche, y ésta varía en función del peso con el que se cargue el coche, la distribución del mismo o la situación en la que se encuentre.

El EBD o *Electronic Brakeforce Distribution* es un sistema es capaz de detectar la transferencia de masas que está teniendo lugar y adecuar a la situación el reparto de la presión de frenado entre las cuatro ruedas [5].

2.4. Control de tracción TCS

El control de tracción evita la pérdida de adherencia en las ruedas motrices en las situaciones de aceleración.

Este sistema se sirve de los sensores de velocidad angular de las ruedas descritos en el ABS para detectar una situación de aceleración en la cual el vehículo pierde adherencia. Si esta situación se produce, el sistema actúa en función del tipo que sea, pero en general hay dos opciones. La primera es que el sistema actúe sobre el sistema de frenos. En este caso, el control de tracción frenaría la rueda que está perdiendo adherencia. La segunda opción es que el sistema actúe sobre la gestión del motor. En este segundo caso, si se detecta que una rueda patina, se limita la potencia que el motor envía a las ruedas, permitiendo así que éstas vuelvan a ganar adherencia.

2.5. Control de estabilidad ESP

Cuando un coche entra en una curva, es frecuente que su comportamiento no sea del todo neutro, especialmente si las condiciones no son las óptimas o si se intenta trazar a una elevada velocidad.

Así, se pueden diferenciar dos situaciones opuestas. La primera es que el coche subvire, es decir, que la curva que está trazando sea más abierta de lo que el conductor transmite al volante. Este comportamiento, característico de los coches con tracción delantera obliga a girar el volante más de lo normal para trazar una curva. La figura 2.2 muestra en color verde cómo sería la trazada ideal y en color rojo la trazada con subviraje.

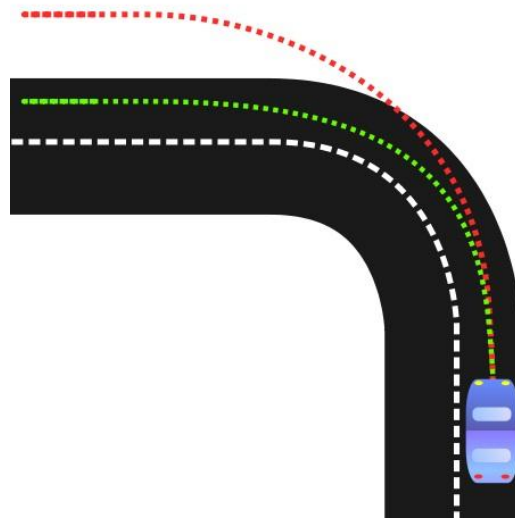


Figura 2. 2 Trazada de un vehículo con y sin subviraje.

La otra situación, característica de los coches con tracción trasera, es el sobreviraje. En este caso el coche gira más de lo que el conductor transmite al volante. De esta forma, para trazar una curva el conductor debe girar menos el volante, e incluso, en los casos más extremos, girarlo hacia el lado opuesto a la curva. En la figura 2.3 se compara la trazada verde (ideal) con la roja (sobreviraje).

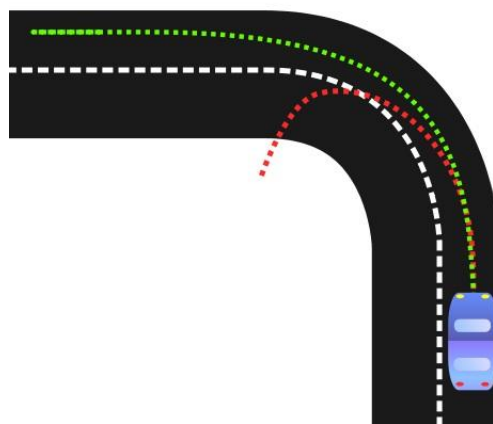


Figura 2. 3 Trazada de un vehículo con y sin sobreviraje.

Es evidente que ninguna de estas dos situaciones es deseable en la conducción, y esta es la razón de que en 1995 Bosch desarrollara el ESP.

ESP son las siglas de *Electronic Stability Program*. Es un sistema capaz de detectar si un vehículo está sobrevirando o subvirando en una curva y actuar sobre los frenos hasta corregir esta situación.

El sistema cuenta con un sensor de giro del volante que mide la posición del mismo, un acelerómetro capaz de medir la fuerza centrípeta a la que está sometido el coche, y sensores de velocidad angular en las ruedas.

Así, el sistema es capaz de detectar que el conductor está inscribiendo en el volante una curva de unos grados determinados. Si el sistema detecta que la aceleración centrípeta sufrida por el coche es menor que la que debería estar sufriendo, interpreta que el coche está subvirando. Del mismo modo, cuando se detecta la situación opuesta el sistema interpreta que el vehículo está sobrevirando.

Cuando se detecta un subviraje, el sistema actúa sobre la rueda trasera interior a la curva. De esa forma se ejerce un par sobre el coche que tiende a que éste se cierre más a la curva. En cambio, cuando se detecta un sobreviraje, el sistema frena la rueda delantera exterior a la curva, provocando un par capaz de sacar la parte delantera del coche del interior de la curva.

La figura 2.4 expuesta a continuación muestra el funcionamiento de este sistema.

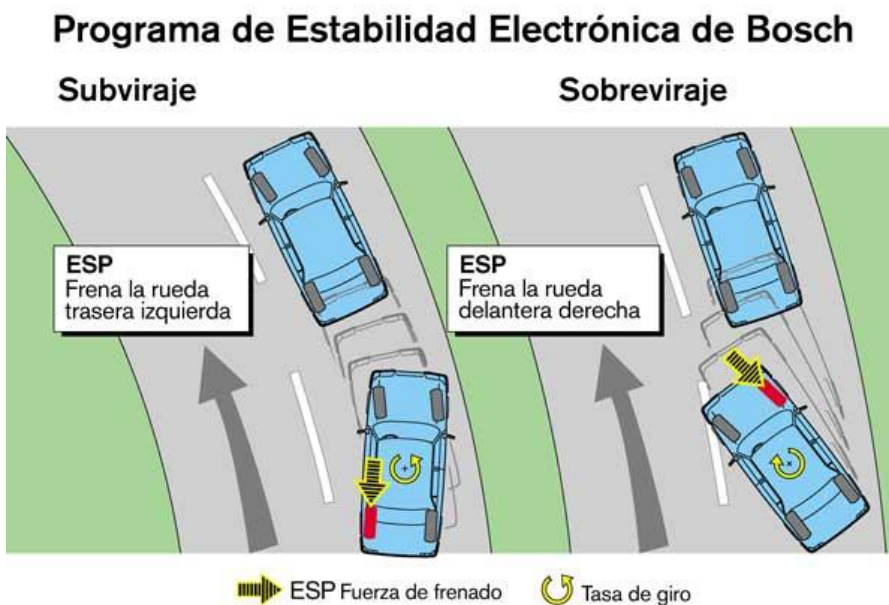


Figura 2. 4 Funcionamiento del ESP.

Este sistema únicamente puede funcionar junto con el ABS, ya que si por frenar una rueda para corregir una trayectoria ésta se bloquea, se puede llegar a una situación de aún más peligro que el subviraje o sobreviraje simplemente.

2.6. Adaptive Cruise Control

El ACC o *Adaptive Cruise Control* es un sistema que actúa como complemento al control de velocidad convencional. Los sistemas de control de velocidad convencionales son capaces de mantener el vehículo circulando a la velocidad fijada por el conductor de forma automática, sin tener que pisar el pedal del acelerador.

El ACC incorpora un radar en la parte delantera del vehículo que detecta al coche que circula por delante, midiendo la distancia que separa el vehículo. De esta forma, cuando detecta que la distancia el vehículo incumple la distancia de seguridad con el coche de delante, el sistema actúa sobre la gestión del motor o si fuera necesario sobre los frenos, para que la distancia con el coche que le precede vuelva a ser segura.

En las figura 2.5 se muestra como sería el funcionamiento de este sistema cuando no se detecta ningún coche, mientras que en la figura 2.6 el sistema habría detectado un obstáculo y habría reducido la velocidad del coche rojo.



Figura 2. 5 Funcionamiento del ACC si no detecta ningún coche.



Figura 2. 6 Funcionamiento del ACC si detecta algún obstáculo.

Este sistema no funciona por debajo de velocidades de entre 25 o 30 km/h, y nunca llega a detener el coche por completo.

2.7. Sistemas pre-colisión

En la actualidad se están lanzando modelos que equipan un sistema de frenado automático de emergencia o pre-colisión. Este sistema es capaz de detectar obstáculos en la parte delantera del vehículo gracias a un sensor, que puede ser de radar, laser o una cámara estéreo para medir distancias. Cuando lo hace, en un primer lugar se avisa al conductor del peligro con una señal acústica o luminosa, pero cuando el riesgo de colisión es inminente, el sistema puede actuar de forma autónoma para detener el vehículo.

2.8. Sistemas de alumbrado

Se consideran sistemas de seguridad activa porque reducen el riesgo de accidente, sin embargo, a diferencia de todos los expuestos anteriormente, éstos no influyen de ninguna forma en el comportamiento del vehículo.

Los sistemas de alumbrado en los vehículos comenzaron siendo únicamente de bombillas de incandescencia. Posteriormente se hizo común el uso de bombillas halógenas por su elevado poder lumínico.

Hoy en día es bastante común encontrar vehículos equipados con faros de xenón. Estos faros alumbran mediante una descarga eléctrica, del tipo de un arco voltaico, en presencia de un gas noble. Esto reduce significativamente el consumo de energía respecto a las bombillas halógenas convencionales.

Actualmente se están empezando a equipar faros que funcionan completamente con diodos LED. Estos diodos consumen una cantidad realmente pequeña de electricidad, y además permiten implementar sistemas capaces de prescindir de dos sistemas de luces (uno para cortas y otro para largas). Estos sistemas son capaces de adaptar la intensidad de luz y la distribución de la misma en función de la presencia de otros vehículos o de la velocidad. Así, cuando se circula deprisa y no hay otros coches por delante, el sistema alumbra potentemente y con la luz dirigida hacia delante para cubrir la mayor distancia posible. Del mismo modo, cuando se aminora la marcha o se detecta la presencia de otros vehículos, el sistema baja la intensidad de la luz para no deslumbrar, y el haz de luz se abre para mejorar la visión periférica. En la figura 2.7 se muestra este funcionamiento.

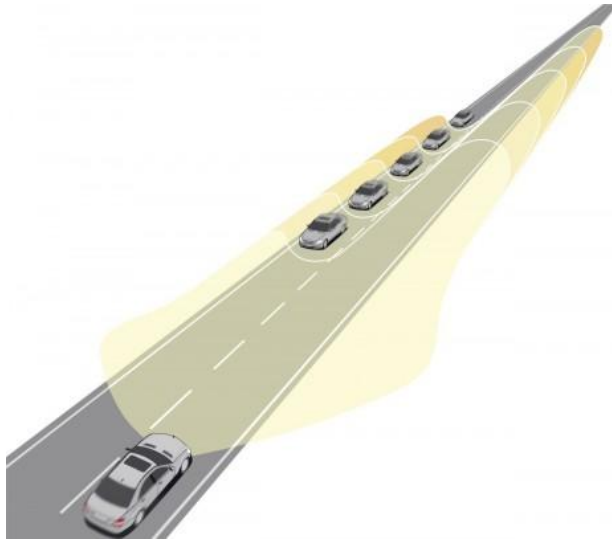


Figura 2. 7 Funcionamiento del sistema adaptativo de luces.

También se puede destacar los sistemas de visión nocturna. Aunque no sean sistemas de alumbrado propiamente dichos, ayudan del mismo modo a obtener una mejor visibilidad.

Estos sistemas cuentan con cámaras infrarrojas capaces de detectar cualquier cuerpo que emita calor (personas o animales) hasta una distancia de 300 metros. El sistema muestra en una pantalla las imágenes captadas por esta cámara tal y como se aprecia en la figura 2.8, y en caso de detectar un cuerpo, se avisa al conductor con una señal acústica [7].



Figura 2. 8 Visualización a través de la cámara infrarroja en el frontal del vehículo.

3 SEGURIDAD **PASIVA**

Gracias a los sistemas de seguridad activa se pueden evitar una gran cantidad de accidentes. Sin embargo esto no es siempre posible y son necesarios otros sistemas de seguridad cuando la colisión es inevitable. Se denominan sistemas de seguridad pasiva a aquellos sistemas destinados a proteger a los ocupantes de un vehículo en caso de colisión.

Algunos de estos sistemas son el cinturón de seguridad o el airbag, pero también se consideran sistemas de seguridad pasiva otros sistemas como la propia estructura del vehículo. A continuación se explicarán algunos de ellos [8].

3.1. Carrocería

La carrocería de un vehículo debe ser diseñada para ser capaz de soportar las sollicitaciones a las que será sometido durante su uso, tales como soportar su propio peso y el de sus ocupantes, aceleraciones o fuerzas aerodinámicas. Es por ello que debe tener una rigidez acorde a los parámetros de diseño planteados. Sin embargo también debe ser capaz de deformarse en caso de colisión para absorber tanta energía como sea posible.

3.2. El fenómeno de colisión

Un impacto está formado por tres tipos distintos de colisiones. La primera es la colisión primaria y es la que tiene lugar entre el vehículo y el objeto contra el que impacta. La segunda es la que sufren los ocupantes contra el interior del vehículo, y la tercera es la existente entre los órganos vitales y las paredes internas.

Antes de producirse la colisión primaria el vehículo posee una energía cinética que depende de su velocidad (v) y su masa (m), y viene dada por la expresión:

$$E_c = \frac{1}{2} m \cdot v^2$$

Para que el vehículo se detenga por completo es necesario disipar esta energía, y este fenómeno se produce debido a la deformación.

En el caso de un ensayo de choque frontal, el vehículo colisiona contra una barrera indeformable, la cual no absorberá nada de energía, y esta deberá ser disipada completamente por el vehículo. Esta energía disipada se cuantifica mediante la fórmula:

$$E_{disipada} = F \cdot d$$

Donde F es la fuerza que se ejerce sobre el vehículo, y d es la distancia que se ha deformado su frontal.

Por tanto, es de suma importancia que la carrocería del vehículo sea capaz de absorber una gran cantidad de energía, ya que cuanto mayor sea ésta, menor será la deceleración que sufrirán los ocupantes.

En otras palabras, cuanto mayor sea la energía disipada en la colisión primaria, menor será la energía remanente en la colisión secundaria.

Sin embargo, una carrocería no puede ser diseñada para deformarse completamente. Es necesario tener en cuenta que los ocupantes viajan dentro del vehículo, y que por tanto existe un espacio, denominado habitáculo de seguridad, el cual no debe deformarse.

Por este motivo los vehículos se diseñan con zonas de absorción de impacto en las partes delantera y trasera, tratando de mantener siempre intacto el habitáculo de seguridad.

3.3. Zonas de absorción de impacto

Las zonas de absorción de impacto son las encargadas de disipar energía mediante su deformación. Se encuentran en el frontal del vehículo y en la trasera, y tienen diferentes efectos según el tipo de impacto al que están sometidas [9].

Podemos diferenciar dos tipos de colisiones frontales, las centradas y las descentradas. Las primeras tienen lugar cuando el vehículo impacta con toda su superficie frontal contra el objeto, mientras que en las segundas tan solo colisiona una parte de la superficie.

En el caso de una colisión frontal centrada, la fuerza del impacto es aplicada en toda la superficie delantera del vehículo. Al ser ésta superficie mayor, la deformación sufrida va a ser menor ya que existen más elementos resistentes, y por tanto la energía disipada también va a ser menor. Sin embargo es menos probable que la deformación afecte al habitáculo de seguridad.

Si la colisión es frontal descentrada, la fuerza se va a ver concentrada en una superficie mucho menor que la anterior y con menos elementos resistentes, por tanto la deformación sufrida va a ser mayor, disipando una mayor energía. El aspecto negativo es que esto también conlleva un mayor riesgo de deformación del habitáculo de seguridad.

Por tanto, aunque una colisión frontal descentrada disipe mayor energía, conlleva más riesgo debido a que es más probable que la deformación afecte al habitáculo de seguridad. Para evitar esta situación se emplean elementos capaces de transmitir los esfuerzos al lado opuesto del vehículo, desviando la deformación a otras zonas. Esto se conoce como deformación programada.

3.4. Deformación programada

Con el fin de proteger a los ocupantes del vehículo, se diseña la carrocería con elementos estructurales capaces de desviar los esfuerzos a otras zonas del vehículo, repartiendo así las deformaciones sufridas por el mismo. De esta forma es posible establecer con antelación la forma en que el vehículo se va a deformar. Así se puede optimizar la deformación de su frontal para que éste absorba la mayor parte de la energía sin llegar a transmitirse al habitáculo de seguridad. El objetivo es consumir la energía de forma ordenada y gradual [10] [11].

Algunos métodos para lograr la deformación programada son:

- Utilizar largueros de espesor variable, siendo estos más finos en la parte delantera y aumentando su grosor en la parte trasera. De esa forma se consigue que estos largueros se deformen según la magnitud del accidente, ya que solo se deformará la parte que sea superada por la energía de la colisión. Estos largueros tendrán forma piramidal o cónica, favoreciendo así su autoembutición.
- Los largueros delanteros en forma de horquilla son capaces de distribuir los esfuerzos hacia el túnel central, los estribos y el piso del vehículo. En la figura 3.1 se muestra un larguero delantero en forma de horquilla perteneciente a un Renault Laguna.



Figura 3. 2 Larguero delantero en forma de horquilla del Renault Laguna.

- Largueros delanteros en forma de cuello de cisne, que tienden a deformarse en los giros de los mismos.
- Travesaños que, en el caso de una colisión frontal descentrada, sean capaces de dirigir los esfuerzos hacia el lado que no se ha visto afectado.
- Es posible dotar a ciertos elementos de puntos fusibles, preestableciendo así la deformación de los mismos. Estos puntos fusibles son zonas diseñadas específicamente para absorber la

mayor energía posible mediante una deformación programada, que se puede conseguir mediante acanaladuras, taladros o muescas. En la figura 3.2 se muestra un tramo de larguero dotado de puntos fusibles para su deformación.

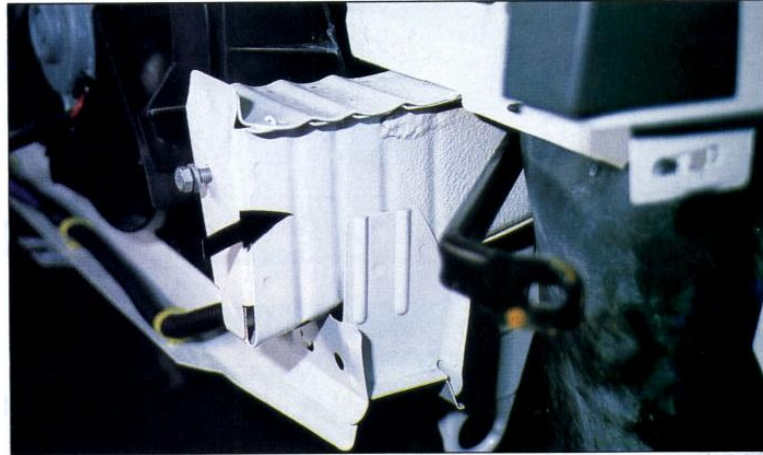


Figura 3. 3 Puntos fusibles de un larguero para su deformación.

A continuación se muestra el mismo larguero tras el impacto. En la figura 3.3 se aprecia cómo se ha deformado gracias a los puntos fusibles.

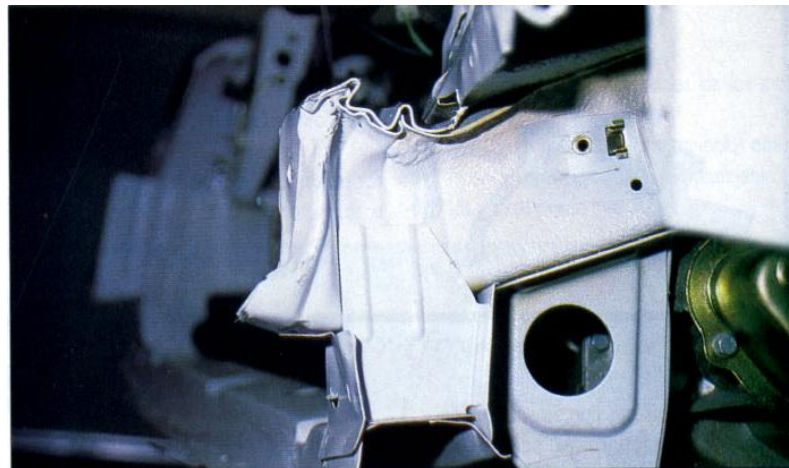


Figura 3. 4 Estado de un larguero con puntos fusibles para la deformación tras ser sometido a un impacto.

- Capós con puntos fusibles para que estos no penetren en el habitáculo a través del parabrisas. Estos puntos fusibles hacen que los capós se doblen por su parte central.

- Los anclajes del motor deben estar situados de tal forma que éste nunca pueda penetrar en el habitáculo. En caso de accidente estos anclajes se desplazarán hacia abajo arrastrando con ellos el motor y la caja de cambios.

3.5. El habitáculo de seguridad

El habitáculo de seguridad es el espacio en el que viajan los ocupantes. Si bien las zonas de absorción de impacto debían deformarse para disipar la mayor cantidad posible de energía, el habitáculo debe ser indeformable para garantizar la integridad de los viajeros. En este sentido, las zonas de absorción de impacto tienen un papel fundamental, ya que son las encargadas de desviar los esfuerzos hacia zonas que no comprometan la rigidez del habitáculo [12].

Además, no sólo se emplearán refuerzos en la estructura, sino que se debe evitar que ningún objeto o elemento llegue a penetrar dentro del habitáculo, como el capó del vehículo o el propio motor.

Por otro lado, evitando que se deforme el habitáculo de seguridad, se podrán abrir las puertas tras una colisión frontal lo que facilitará la salida o el rescate de los ocupantes.

Los elementos más comunes para evitar el colapso del habitáculo de seguridad son [13]:

- Refuerzos en las puertas. Su función es aportar rigidez al habitáculo en el caso de choque lateral. En la figura 3.4 se muestran los refuerzos en las puertas de un Volvo S40.



Figura 3. 5 Refuerzos laterales de un Volvo S40.

- El uso de aceros de distinta resistencia en los distintos elementos, en función de su cometido. En la figura 3.5 se muestran los distintos aceros que emplea Audi en la fabricación de su modelo A5 Sportback. Se puede apreciar cómo los aceros de más alta resistencia se utilizan en los elementos que componen el habitáculo de seguridad.

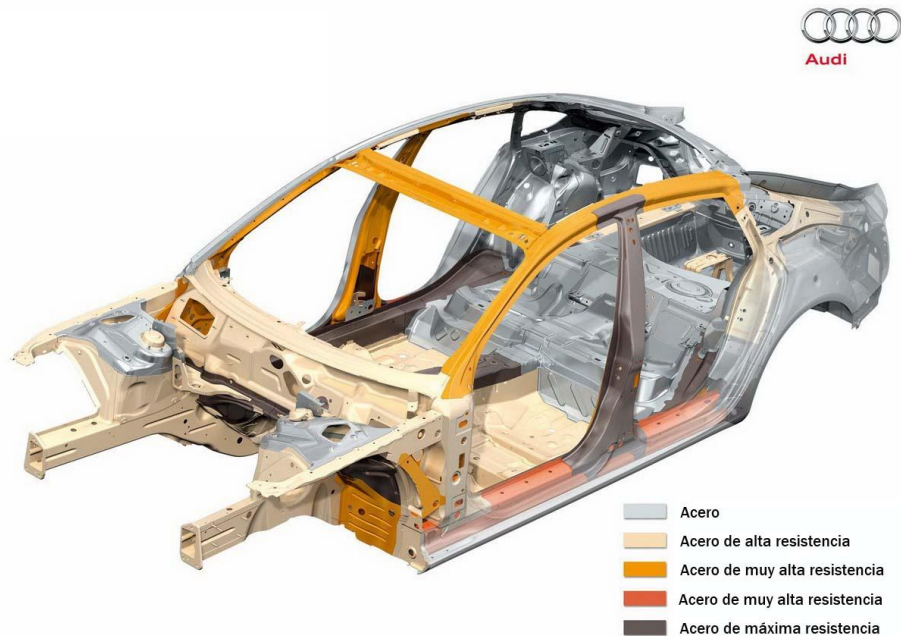


Figura 3. 6 Estructura de la carrocería de un Audi A5.

- La columna de la dirección está formada por elementos fusibles para que, en caso de colisión, no sea un elemento rígido y no sea arrastrado hacia dentro del habitáculo por el tren delantero. De lo contrario el volante se incrustaría en el pecho del conductor. Esto se consigue empleando columnas telescópicas, columnas fabricadas en varios tramos unidos con juntas cardan o simplemente dotadas de elementos fusibles. A continuación se muestran en la figura 3.6 los sistemas mencionados anteriormente.

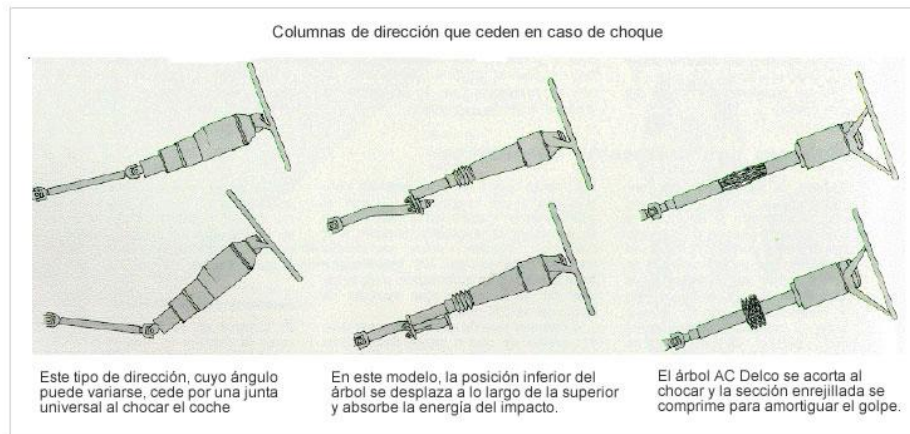


Figura 3. 7 Tipos de columnas de dirección.

- Los pedales se fijan en un sistema capaz de desplazarse hacia delante de forma parecida a la columna de la dirección, protegiendo así las piernas del conductor.
- Las lunas delanteras y traseras del vehículo son laminadas y evitan su rotura en pequeños trozos.
- La mayoría de los vehículos cuentan estructuras de refuerzo tras el salpicadero. Su principal función es evitar la intrusión de elementos de la mecánica en el habitáculo, aunque también proporcionan una cierta rigidez al salpicadero en el caso de una colisión lateral.

3.6. El cinturón de seguridad

El cinturón de seguridad es el elemento de seguridad pasiva más eficaz inventado hasta la fecha, por encima del airbag o de la deformación programada de la carrocería. Consiste en un arnés cuya función es mantener el cuerpo de los ocupantes del vehículo en sus asientos en caso de impacto. Su principal objetivo es minimizar la magnitud de la colisión secundaria, que es la que se produce entre tras haber impactado el vehículo, y que tiene lugar entre los ocupantes y el interior del automóvil. También evita que los ocupantes salgan despedidos fuera del vehículo [14].

El cinturón de seguridad empezó siendo utilizado en aeronaves y posteriormente se comenzó a montar en automóviles en la década de 1950.

Inicialmente el cinturón de seguridad era de dos puntos y aseguraba la cadera. Este diseño podía ser peligroso porque podía llegar a separar la espina lumbar, causando parálisis. Por ello el cinturón de seguridad se

modificó y se comenzó a montar un cinturón de seguridad de un solo tramo pero que asegurara el tronco superior. El inconveniente de este diseño era que no podía sujetar bien al ocupante y este podía deslizarse por debajo del cinturón. A continuación se muestra la figura 3.7 en la que aparece el citado cinturón de dos puntos.



Figura 3. 8 Ejemplo de cinturón de dos puntos.

En 1959, el ingeniero de Volvo Nils Bohlin patentó el cinturón de tres puntos, siendo una combinación de los dos diseños anteriores. Volvo montó por primera vez este diseño en el modelo Amazon, y a continuación liberó la patente para que su diseño pudiera ser copiado por el resto de fabricantes. Actualmente es el que se monta por norma en casi todos los vehículos de calle. En la figura 3.8 se muestra el esquema básico de un cinturón de 3 puntos.



Figura 3. 9 Ejemplo de cinturón de tres puntos.

Su efectividad se debe a que el cinturón es capaz de distribuir la fuerza de retención por dos zonas resistentes del cuerpo, como son la pelvis y el tórax. Además la sección del cinturón tiene una anchura suficiente para que la presión se reduzca y se minimiza la posibilidad de daños.

En la actualidad se encuentran otros elementos que complementan al cinturón de seguridad aumentando su efectividad. Tal es el caso de los pretensores, el carrete inercial o los limitadores de esfuerzo o tensión.

El carrete inercial es un elemento que permite desenrollar el cinturón de forma lenta. Posteriormente, el carrete trata de volver a enrollar el cinturón, contribuyendo así a mantenerlo pegado al cuerpo. Sin embargo, cuando se trata de desenrollar rápidamente el cinturón, como es en el caso de impacto, el carrete se bloquea y el cinturón es capaz de retener el ocupante.

Los pretensores son los encargados de ajustar el cinturón al cuerpo de los ocupantes en caso de colisión. De esta forma, cuando el ocupante comience a desplazarse por efecto de la deceleración, el cinturón ya estará tenso y habrá un menor riesgo de lesiones al limitarse el desplazamiento. Estos pretensores pueden ser mecánicos o pirotécnicos, y entran en funcionamiento cuando los sensores correspondientes detectan un impacto. Suelen ir situados en el segundo punto de anclaje del cinturón. En la figura 3.9 se muestra el funcionamiento de este sistema.

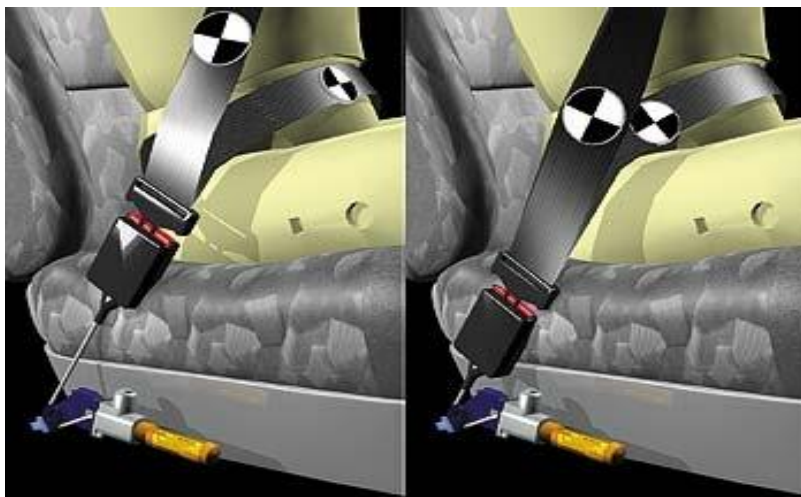


Figura 3. 10 Funcionamiento del pretensor del cinturón de seguridad.

El limitador de esfuerzo, está diseñado para no transmitir al cuerpo del sujeto una presión excesiva debido a la desaceleración del accidente, es decir, evita una sobrecarga de fuerza aplicada al cinturón de seguridad

cuando el ocupante es retenido, mitigando de esta manera el impacto aplicado al pecho.

El limitador de tensión o esfuerzo empieza a actuar después del pretensor. El cinturón ya está bloqueado y está sujetando al cuerpo. Si el choque es muy violento, la presión del cinturón puede provocar daños como la rotura de una costilla. El limitador de tensión permite que el punto de fijación del cinturón se estire controladamente, para limitar la presión máxima que hay entre el cuerpo y el cinturón [15].

3.7. El airbag

El airbag es un dispositivo de seguridad pasiva que consiste en una bolsa de nylon llena de aire. Entra en funcionamiento cuando se produce una colisión y su función es la de amortiguar el golpe de los ocupantes contra el volante o el salpicadero del vehículo.

El sistema de airbag se compone de tres elementos básicos para su funcionamiento. Estos son:

- Bolsa de nylon.
- Componentes químicos capaces de crear una explosión.
- Sensores capaces de detectar un impacto.

Cuando los sensores detectan un impacto, los componentes químicos reaccionan dando lugar a una explosión dentro de la bolsa de nylon, la cual se inflará durante unas decimas de segundo, amortiguando el impacto.

Existen distintos tipos de airbag en función de la zona del coche en la que vayan instalados o la zona del cuerpo que van a proteger. Los más habituales son:

- Airbag frontal (conductor y acompañante). Evitan el impacto contra el salpicadero y el volante. En la figura 3.10 se observa el funcionamiento de estos airbag.



Figura 3. 11 Ejemplos de airbag de conductor y acompañante.

- Airbag lateral. Van situados en el interior de los asientos y protegen el tórax de los ocupantes en una colisión lateral.
- Airbag de cortina. Montados en el techo del vehículo, su función es la de proteger la cabeza en una colisión lateral. En la figura 3.11 se aprecian los airbag del tipo lateral y de cortina.



Figura 3. 12 Airbag lateral y de cortina.

Aunque su uso reduce el riesgo de muerte, esto sólo es así cuando se usa como complemento del cinturón de seguridad. De lo contrario puede llegar a ser contraproducente, causando mayores lesiones.

3.8. Los reposacabezas

Los reposacabezas son un apoyo para la cabeza de los ocupantes. Su función es minimizar las lesiones cervicales en caso de impacto por alcance.

En este tipo de colisiones, el cuerpo de los ocupantes tiende a desplazarse hacia atrás, siendo retenido por el propio asiento. Sin embargo si no existe reposacabezas, la cabeza sigue su recorrido hacia atrás, pudiendo producir lesiones en los ligamentos o incluso en la médula espinal. En tal caso es probable que el pasajero quede paralítico o muera desnucado [16].

Lo anterior también es aplicable en las colisiones frontales, ya que como reacción a éstas, el cuerpo también se desplazará hacia atrás, produciendo los mismos efectos.

Los reposacabezas han ido evolucionando a lo largo de los años, y actualmente se pueden encontrar reposacabezas activos. Su funcionamiento es similar al de los pretensores del cinturón, explicado anteriormente. En este caso, al detectar la colisión se liberan unos muelles ya pretensados que desplazan el reposacabezas unos centímetros hacia arriba y hacia delante, para que de esa forma el movimiento de la cabeza sea menor.

En la figura 3.12 se muestra el funcionamiento de un reposacabezas activo.

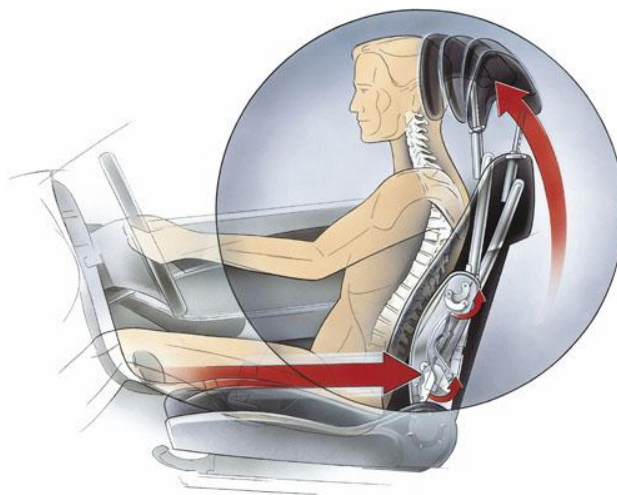


Figura 3. 13 Funcionamiento de un reposacabezas activo.

4 ENSAYOS DE **CHOQUE**

Debido a la elevada siniestralidad de las carreteras actuales, es una preocupación cada vez mayor que los vehículos satisfagan unas expectativas de seguridad razonables ante un posible accidente.

Si bien las autoridades competentes en materia de tráfico tienen como objetivo mejorar la circulación y evitar accidentes, existen otros mecanismos para garantizar la integridad de las personas cuando se produce un accidente.

Por este motivo, para que un vehículo pueda ser comercializado en la unión europea, debe superar una serie de pruebas que garanticen que ante una colisión, el vehículo va a cumplir con la normativa vigente de seguridad.

Cada vez es más común utilizar software de simulación de accidentes por ordenador. Si bien es cierto que los resultados que arrojan estos programas son de una gran fiabilidad, los ensayos reales siguen siendo imprescindibles ya que no hay nada más fiable que la propia realidad. En la figura 4.1 se muestra un ensayo simulado por ordenador.

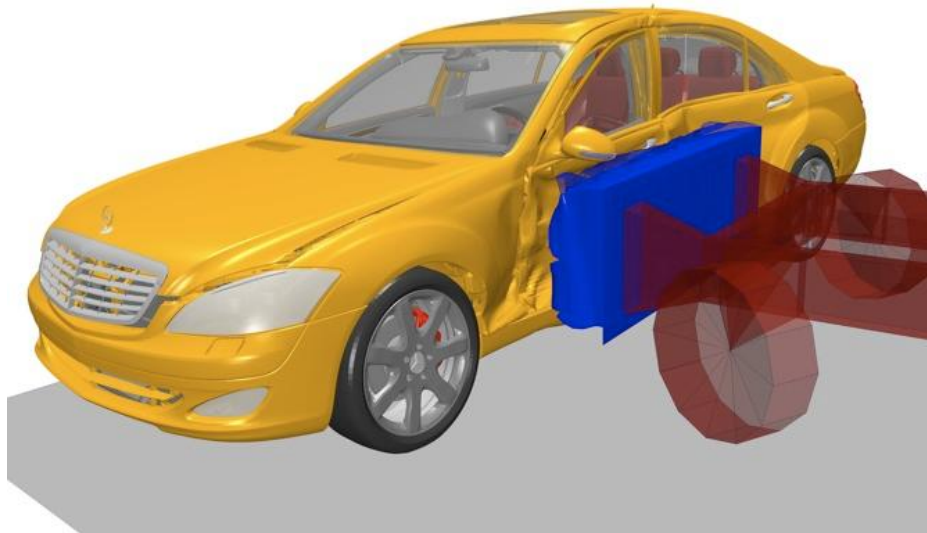


Figura 4.1 Ensayo simulado por ordenador.

Por ello se realizan los ensayos de choque siempre bajo unas condiciones tales que sean capaces de recrear una situación concreta, y así poder comparar los resultados que obtienen los distintos modelos de coche.

Actualmente, estos ensayos de choque son realizados por distintas asociaciones, siendo las de más repercusión a nivel europeo el *European New Car Assessment Programme* (EuroNCAP) y a nivel norteamericano la *National Highway Transportation Safety Administration* (NHTSA).

Estas asociaciones evalúan los resultados de someter al coche a un impacto concreto. Los modelos que utilizan son modelos comercializados, por lo tanto modelos que ya han superado los ensayos de homologación. Sin embargo, la característica de estas asociaciones es que evalúan las lesiones sufridas por los *dummies* y publican los resultados. De esta forma se pone de manifiesto la seguridad que aporta un vehículo a sus ocupantes o al resto de usuarios de la vía. En la figura 4.2 se muestra un ensayo de choque frontal realizado por EuroNCAP.



Figura 4.2 Estado de un coche tras sufrir un impacto frontal.

Así, los fabricantes utilizan estos resultados para vender automóviles. Esto a su vez provoca que la industria automovilística se esfuerce por estar a la vanguardia de la seguridad y se avance hacia un automóvil más seguro.

4.1. Historia

Durante la década de 1940 se comenzó a investigar con cadáveres humanos. Se realizaban pruebas para determinar la capacidad del cuerpo para resistir las fuerzas de aplastamiento y desgarramiento que tienen lugar en una colisión.

Sin embargo, estas pruebas cayeron en desuso ya que los cadáveres eran de personas de avanzada edad y no eran muestras representativas de la población que podía sufrir un accidente de tráfico.

Debido a esto, y al conflicto moral que representaba realizar ensayos de impacto con cadáveres humanos, se comenzaron a hacer pruebas con animales. Alguna vez se utilizaban chimpancés, pero sobre todo se utilizaron cerdos, debido a que su estructura interna es muy parecida a la de los seres humanos.

El primer *dummy* se utilizó en 1971. Este *dummy* fue el *Hybrid I*, fabricado por General Motors. De esta forma se consiguió por primera vez simular de forma realista el efecto que tendría sobre una persona representativa de la población un determinado impacto, y además daba la posibilidad efectuar distintos ensayos sobre el mismo modelo de *dummy*, con las mismas características, para así poder compararlos y obtener conclusiones.

En 1988 tuvieron lugar las primeras pruebas llevadas a cabo por las asociaciones en lugar de por los fabricantes. Éstas fueron realizadas sobre 6 utilitarios.

La EuroNCAP (*European New Car Assessment Programme*) nace en el año 1997 con el objetivo de realizar ensayos de choque sobre vehículos que ya se encontraban en el mercado. De esta forma se aseguraba que el vehículo probado era el mismo que el consumidor encontraría en la calle, evitando así que las unidades probadas fueran prototipos con unas mejores cualidades que el modelo de calle.

Estas pruebas se empezaron a publicar y se creó así un nuevo escaparate para los fabricantes de automóviles, que vieron cómo gracias a esta difusión, el público podía apreciar el nivel de seguridad que ofrecía un modelo determinado. Al mismo tiempo esto aceleró aún más las investigaciones de los fabricantes, pues quedó demostrado que la seguridad vendía coches.

En 1998 se estableció la nueva normativa que había sido desarrollada con la colaboración de las asociaciones de automovilistas, en la que se incluía el ensayo de choque lateral contra una barrera móvil deformable.

La prueba de choque lateral contra un poste y la prueba de ensayo con sillitas de retención infantil no se incluirían en la normativa hasta el año 2000, y la de atropello hasta 2005.

4.1.1. Historia del *dummy*

A pesar de que ya se habían realizado ensayos con animales y con cadáveres humanos, no fue hasta el desarrollo del primer *dummy* cuando se empezaron a obtener resultados fiables de las consecuencias reales que tendría un impacto sobre una persona.

El primer *dummy* que se fabricó fue el "Sierra Sam", un *dummy* desarrollado por Samuel W. Alderson en 1949 junto con la empresa de ingeniería Sierra. Este prototipo se utilizó en las pruebas de un asiento eyectable con arnés para un avión [17].

A partir de entonces, el laboratorio Alderson empezó a trabajar en nuevo *dummy* orientado a los ensayos de choque en automóviles. De ese modo nace la serie VIP-50, el cual se muestra en la figura 4.3. Tras su presentación, Sierra desarrolló su propio modelo de *dummy*, el "Sierra Stan". A pesar de que ambos modelos tenían como propósito ser utilizados en ensayos de choque de vehículos de General Motors, ninguno de los dos cumplía con los requisitos buscados por el fabricante. Esto provocó que en 1971 naciera el modelo de *dummy* "Hybrid I", modelo desarrollado íntegramente por General Motors.



Figura 4.3 Dummy VIP-50.

El primer *dummy*, el "Sierra Sam" era un *dummy* percentil 95, es decir, era más pesado y grande que el 95% de los hombres. El *Hybrid I* por su parte, era un percentil 50, por lo que simulaba a un humano promedio en cuanto a masa, altura y proporciones.

En 1972 se lanza el *Hybrid II*, una evolución del *Hybrid I* que incluía rodillas, hombros y columna vertebral.

En 1976 aparece el *Hybrid III*, una nueva generación de *dummies* compuesta por varios modelos representativos de la sociedad. Estos *dummies* fueron desarrollados por General Motors junto con la "National Highway Transportation Safety Administration" (NHTSA). Así, la serie de *dummies Hybrid III* está formada por los siguientes modelos:

- *Hybrid III* masculino percentil 50: masa 77kg y altura de 168cm.
- *Hybrid III* masculino percentil 95: masa de 100kg y altura de 188cm.
- *Hybrid III* femenino percentil 50: masa de 50kg y altura de 152cm.
- *Hybrid III* infantil 6 años: 21kg.
- *Hybrid III* infantil 3 años: 15kg.

En la figura 4.4 se muestran varios modelos del dummy Hybrid III.



Figura 4.4 Dummy Hybrid III.

Actualmente se utilizan *dummies* específicos para cada ensayo de choque (frontal, lateral contra una barrera, lateral contra un poste, atropello...).

4.2. Entidades que realizan los ensayos de choque

Existen diferentes tipos de entidades que realizan ensayos de choque en vehículos. Cada una de ellas los realiza con un fin distinto, aunque todas ellas tienen como objetivo evaluar el nivel de seguridad que ofrece el modelo probado en caso de accidente.

Los principales organismos que realizan ensayos de choque son:

- Organismos de homologación.
- Fabricantes.
- Organizaciones privadas.

4.2.1. Fabricantes

En las primeras fases del diseño de un nuevo vehículo, los fabricantes emplean software de simulación de accidentes que les permite conocer de antemano el comportamiento que va a tener un determinado diseño en caso de colisión. Además, en caso de no obtener resultados favorables, permite modificar el diseño adecuándolo a las exigencias.

Los fabricantes de automóviles realizan ensayos de choque reales en los vehículos cuando estos se encuentran en las últimas fases de su desarrollo. De esta forma pueden constatar los resultados que ya habían obtenido en las simulaciones por ordenador. Los resultados y las mediciones de un ensayo real son completamente realistas, sin embargo el diseño ya es poco modificable cuando se alcanza esta fase de desarrollo.

De esta forma los fabricantes se aseguran de que el nuevo modelo superará las pruebas de homologación de las regiones en las que se vaya a comercializar.

4.2.2. Organismos de homologación

Cada vehículo que sale al mercado ha sido probado por los organismos de homologación, las cuales se encargan de verificar que cumple con las exigencias de la normativa vigente.

Esta normativa puede ser relativa a seguridad activa, seguridad pasiva, niveles de emisión de contaminantes, ruidos, etc. Existen distintas normativas en función de la región donde se vaya a comercializar el vehículo, si bien es cierto que las exigencias no distan mucho unas de otras.

En el caso concreto de la normativa relativa a seguridad pasiva, en Europa se tiene una directiva común, mientras que países como EE.UU., Canadá o Japón tienen la suya propia.

Los ensayos de choque los realizan centros de verificación acreditados para tales fines. En ellos los fabricantes pueden realizar los ensayos de acuerdo a lo estipulado en cualquier normativa. De este modo, en un mismo centro el fabricante puede realizar un ensayo de choque con las condiciones de la normativa europea o con la normativa estadounidense, por ejemplo, para poder comercializar en ambas regiones su modelo.

Un ejemplo de los centros que se encargan de verificar los vehículos para su homologación, es el INTA, Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial [18].

4.2.3. Organizaciones privadas

Son organizaciones cuyo principal objetivo es evaluar la seguridad (activa y pasiva) de los últimos modelos de automóvil y publicar sus resultados. En concreto destacan los consorcios NCAP, acrónimo de *New Car Assessment Programme*. De estos, el más importante a nivel europeo y nacional es la EuroNCAP [19].

La EuroNCAP fue creada en 1997 por varias asociaciones y organismos europeos. Entre ellos se encuentran el club alemán de automovilistas ADAC, la fundación FIA, los gobiernos de Reino Unido, Alemania, Suecia, etc. La comisión Europea es un miembro observador del consejo de EuroNCAP, y ofrece su apoyo político [19].

De esta forma la EuroNCAP puede asegurar que es independiente de la industria del automóvil, y que sus resultados son completamente fidedignos.

El objetivo de EuroNCAP es instar a los fabricantes a superar los requisitos mínimos que exigen las entidades de homologación, para de esta forma poner en circulación coches aún más seguros.

Por ejemplo, Honda sometió a su modelo Civic a las pruebas de la EuroNCAP en el año 2006 y más tarde volvió a pasar las pruebas con el mismo modelo en el año 2007. La razón es que debido a unos resultados mediocres en el ensayo de impacto frontal, Honda decidió sustituir los

pretensores de los cinturones delanteros por otros con mayor recorrido y los airbag del conductor y del acompañante por unos de dos etapas en lugar de los de una sola etapa que equipaba. El resultado consistió en obtener 11,9 puntos en el choque frontal en 2007, superando los 10,8 que obtuvo en 2006.

Este es un claro ejemplo de lo que persigue la EuroNCAP. A través de la divulgación de los resultados, crear un escaparate para los fabricantes de automóviles en el cual muestren la seguridad que ofrecen en sus vehículos. De esta forma son los propios fabricantes los que deciden invertir recursos en mejorar sus vehículos.

En función del nivel de seguridad activa, seguridad pasiva, seguridad a los peatones en caso de atropello, etc. que presenta un vehículo se le otorga una puntuación en las distintas pruebas de impacto. Esta puntuación se expresa mediante estrellas (de cero a cinco).

Estas puntuaciones sólo son comparables entre vehículos de la misma categoría. Esto es debido a que el peso y las dimensiones del vehículo son factores determinantes en los resultados arrojados en cuanto a seguridad pasiva.

4.3. Tipos de ensayos de choque

Es imposible determinar un patrón más o menos exacto del tipo de accidentes que se sufren en los automóviles. Sin embargo, atendiendo a las estadísticas, se puede llegar a reproducir una situación que abarque una parte significativa de los accidente graves [18].

Las pruebas más comunes y representativas son:

- Impacto frontal
- Impacto lateral
- Impacto trasero
- Vuelcos
- Atropellos a peatones

4.3.1. Ensayo de impacto frontal

En este ensayo se lanza el vehículo contra una barrera deformable. Esta barrera permanece inmóvil y está formada por una estructura de panal de abeja deformable. El vehículo se lanza de manera que impacte de forma frontal pero descentrada. En concreto, el nivel de solapamiento con la

barrera debe ser de un 40% de la parte más ancha del coche, sin contar los retrovisores.

Esto es debido a que la mayor parte de los accidentes frontales que se producen son descentrados. En rara ocasión el choque se produce de forma completamente frontal debido a que los conductores de ambos vehículos suelen tener algún tiempo para desviarse cada uno hacia su derecha e intentar salirse de la trayectoria del otro vehículo.

El ensayo de homologación se realiza a 56 km/h, siguiendo así el reglamento 94 de la comisión Europea. La EuroNCAP sin embargo realiza esta prueba a una velocidad de 64 km/h. Según EuroNCAP, esta velocidad de ensayo simula los efectos que tendría una colisión entre dos vehículos que circulan a 55 km/h. La velocidad relativa entre ambos vehículos sería de 110 km/h, lo cual supone una diferencia de 46 km/h con respecto al ensayo de EuroNCAP. Esto es debido a que un coche tiene una mayor capacidad de deformación que la barrera, y por tanto absorbe una mayor cantidad de energía en el impacto, amortiguando en parte el impacto. En la figura 4.5 se muestran las condiciones en las que realiza EuroNCAP el ensayo de choque frontal.

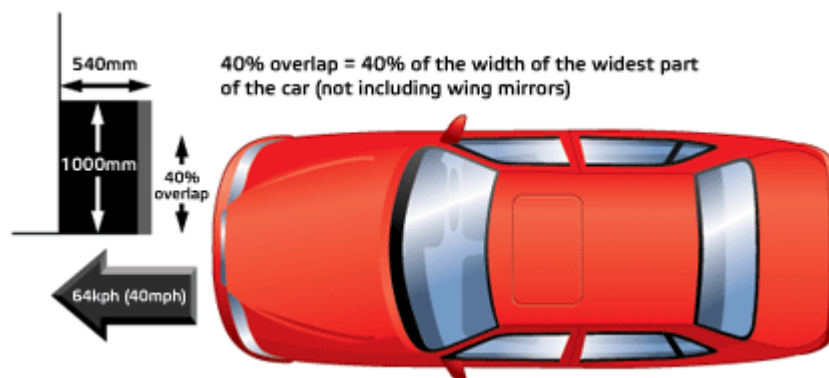


Figura 4.5 Ensayo frontal según EuroNCAP.

Normalmente los vehículos implicados es un choque frontal circulan a velocidades superiores a 55 km/h, sin embargo, del mismo modo que se ha explicado antes, instantes antes a la colisión los conductores tienen algún tiempo para frenar el coche. Así, no es común que se produzca un accidente en el que ninguno de los conductores haya frenado antes.

El ensayo evalúa sobre todo la capacidad del habitáculo de seguridad de no deformarse y evitar la intrusión de partes del compartimento. El contacto entre el pasajero y los elementos del habitáculo es la principal causa de heridas graves y muertes. Al impedir la intrusión de espacio, las posibilidades de que el ocupante resulte impactado en el interior del coche

se minimizan. En la figura 4.6 Se puede apreciar el estado final del vehículo tras el ensayo.



Figura 4.6 Estado final de un vehículo tras sufrir un ensayo frontal.

Los tres elementos que mayores heridas pueden llegar a causar son el motor, el volante y los pedales.

Para evitar la intrusión del motor en el habitáculo de seguridad, éste se monta sobre unos soportes que tienen una forma tal que al producirse un impacto lateral, van a bajar hacia la parte inferior del vehículo, llevándose con ellos el motor y evitando que penetre en el habitáculo.

El volante por su parte, cuenta con el airbag, que minimiza la severidad del impacto, y además posee una columna de dirección colapsable, que se pliega hacia dentro con el impacto.

Los pedales cuentan con unos sistemas parecidos a los de los anclajes del motor, que minimizan las lesiones sobre las rodillas.

4.3.2. Ensayo de impacto lateral

Aproximadamente una cuarta parte de las lesiones graves o mortales que se producen en las carreteras son debidas a este tipo de impactos. Los impactos laterales pueden ser entre un vehículo que impacta sobre otro

vehículo, o sobre un vehículo que impacta lateralmente contra un poste o árbol.

Por esta razón se diferencian en la actualidad los dos tipos de ensayos.

4.3.2.1. Ensayo de impacto lateral contra otro vehículo

En este ensayo, el segundo más importante, se evalúa la seguridad que ofrece un vehículo cuando es impactado lateralmente por otro. Para ello se hace que una barrera deformable móvil impacte por el lateral de conductor del vehículo que se quiere evaluar.

La barrera se monta sobre un impactador que se lanza sobre el otro coche a una velocidad de 50 km/h. Esta barrera tiene una anchura de un metro y medio y una altura de 0,5 metros, siendo la profundidad máxima de deformación 0,5 metros. La evaluación de lesiones se realiza sobre un *dummy* colocado en el asiento del conductor con los sistemas de retención correctamente colocados. La figura 4.7 muestra las condiciones de este ensayo.

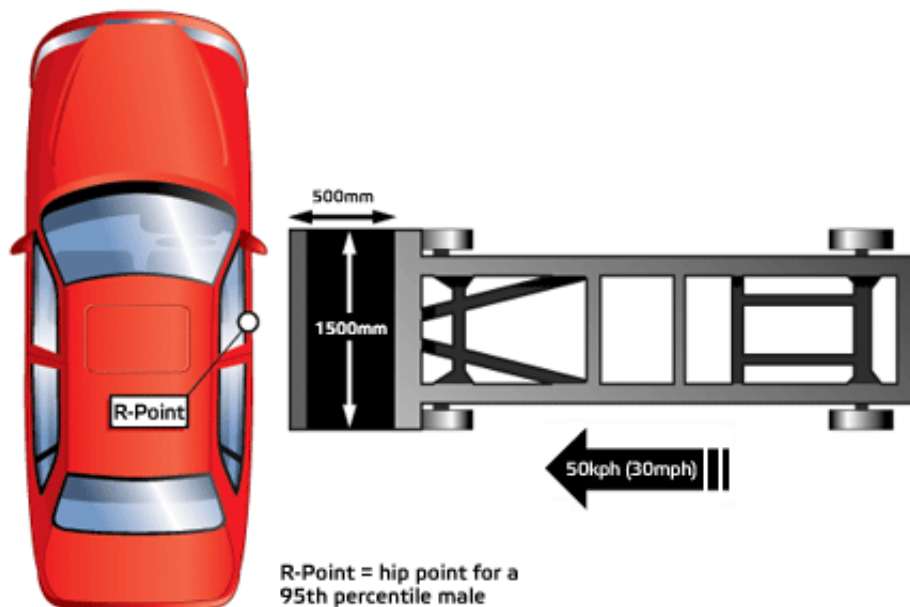


Figura 4.7 Condiciones ensayo lateral según EuroNCAP.

El parámetro a evaluar es principalmente el nivel de intrusión de la carrocería en el habitáculo de seguridad. En los últimos años se están consiguiendo mejores resultados debido al uso de airbags laterales. La

figura 4.8 muestra el momento en el que el vehículo sufre el impacto de la barrera deformable móvil.



Figura 4.8 Estado final de un coche tras sufrir un ensayo lateral.

4.3.2.2. Ensayo de impacto lateral contra un poste

En este ensayo se lanza el coche de forma lateral sobre una plataforma corredera contra un poste rígido. El en ensayo el vehículo es impulsado a una velocidad de 29 km/h. Al ser el poste estrecho, la intrusión en el habitáculo será mayor que en el impacto lateral de un vehículo contra otro vehículo. La figura 4.9, obtenida de la web de EuroNCAP [19], muestra un esquema del ensayo de choque.

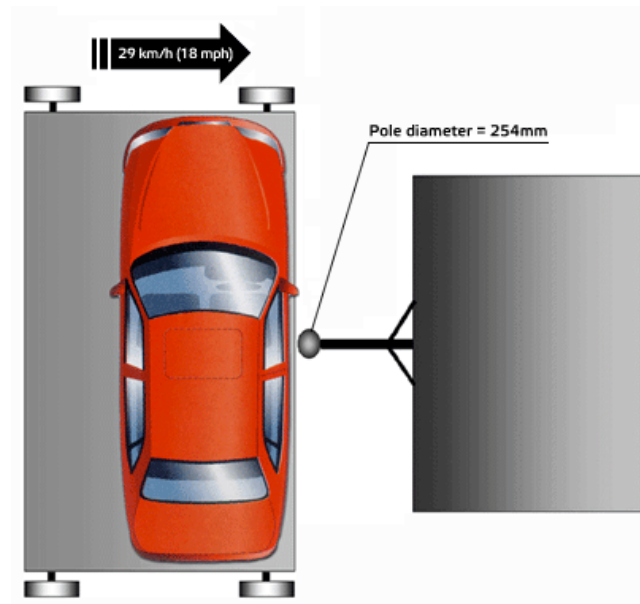


Figura 4.9 Esquema de un impacto lateral contra un poste.

En esta prueba los airbags de cabeza tienen un papel determinante. Sin ellos la cabeza puede atravesar la ventana y llegar a impactar directamente contra el poste, alcanzando valores del criterio de lesión cerebral de hasta 5000, cuando la probabilidad de lesión cerebral grave corresponde a un HIC de 1000. Con el uso de los airbag de cabeza, este valor se encuentra en torno a 100 o 300. La figura 4.10 muestra la importancia de los airbag de cabeza en este tipo de impactos.



Figura 4.10 Estado de un coche tras sufrir un ensayo contra un poste.

4.3.3. Ensayo de impacto trasero

La normativa a seguir en estos ensayos es la ECE/32/34. El ensayo se realiza lanzando una barrera deformable móvil contra la parte trasera del coche a una velocidad de 35km/h. Tras el impacto las puertas y el maletero deben poder abrirse, la tapa del maletero no debe penetrar en el habitáculo y el depósito debe permanecer estanco.

En los ocupantes se evalúa el daño producido por el llamado latigazo cervical. En este sentido los asientos y los reposacabezas son fundamentales ya que son capaces de reducir las lesiones cervicales. La figura 4.11 muestra un ensayo de impacto trasero.



Figura 4.11 Estado final de un coche tras un impacto trasero.

4.3.4. Ensayo de vuelco

En este ensayo se evalúa de nuevo la capacidad de la capacidad para no deformarse del habitáculo. En este caso en concreto se evalúa la rigidez del techo y de los pilares que lo sostienen.

El modo habitual de llevar a cabo este ensayo es lanzando el coche sobre una plataforma inclinada a 50 km/h y deteniéndola repentinamente, provocando así que el vehículo salga despedido volcando y dando vueltas "de campana".

Existe un segundo modo de realizar el ensayo, y es dejando caer el vehículo sobre su pilar A del lado del conductor desde una altura de 0,5 metros.

4.3.5. Atropello a peatones

Este test determina la seguridad que proporciona un vehículo a un peatón. El ensayo es complicado debido a que en un primer lugar el vehículo impacta a 40km/h contra la pierna del dummy, pero tras ese momento, éste puede seguir distintas trayectoria y no es posible saber el sitio exacto en el que impactará la cabeza. La figura 4.12 muestra una instantánea de este ensayo de atropello.



Figura 4.12 Ensayo de atropello.

Debido a esta complejidad a veces el ensayo se modifica y se hacen distintas pruebas. Se ensaya la parte inferior de la pierna contra la parte baja del paragolpes, la parte superior de la pierna contra la parte alta del paragolpes y la cabeza del *dummy* contra el capó del coche.

Se utilizan *dummies* de distinto tamaño debido a que los efectos de un atropello dependen en gran parte de la parte del cuerpo sobre la que se produzca el impacto.

Para mejorar la seguridad de los peatones frente al atropello se toman medidas como instalar paragolpes altamente deformables al impactar contra la pierna e intentando que este impacto se produzca lo más abajo posible, o tratar de que el capó sea lo más flexible posible.

5 EL MÉTODO DE **LOS ELEMENTOS** **FINITOS**

La ingeniería analiza sistemas reales y a menudo estos sistemas se desarrollan en medios continuos. Esta característica dificulta la tarea de obtener resultados numéricos concretos en estos problemas. Es por ello que desde siempre el ser humano ha tratado de discretizar estos medios, para resolver complicados sistemas continuos.

Se tiene constancia de que los egipcios en el siglo XXX a. C ya utilizaban el principio de discretización de elementos continuos para calcular el volumen de las pirámides. Más tarde, Arquímedes (287 – 212 a. C) también utilizó esta misma técnica para calcular el volumen de diferentes objetos [20].

Estos y otros problemas continuos han provocado que ingenieros y matemáticos hayan buscado distintas formas de discretizar un medio y resolver las ecuaciones que lo definen. Para ello, los ingenieros han tratado de dividir un medio continuo en un número determinado de elementos, lo suficientemente grande como para que la solución se aproxime considerablemente bien a los resultados reales. Por otro lado, los matemáticos han desarrollado técnicas para la resolución de ecuaciones diferenciales. La combinación de ambas técnicas ha dado lugar al método de elementos finitos.

Antiguamente, para obtener resultados de un sistema continuo era necesario construir un prototipo y tras su ensayo, medir resultados. Sin embargo, tras la aparición del método de los elementos finitos (MEF) en el siglo XX, es posible resolver estos problemas sin la necesidad de su ensayo, con el ahorro de recursos (humanos y monetarios) que ello conlleva.

Gracias al MEF se puede crear un modelo matemático del sistema real. Este modelo matemático se presta más fácilmente a modificaciones. Sin embargo, aunque sea un gran avance en la ingeniería, los prototipos siguen siendo necesarios en algunas aplicaciones que requieren un gran grado de exactitud o que implican una gran responsabilidad.

Aunque como se ha explicado anteriormente, físicos e ingenieros utilizan métodos de discretización desde hace siglos, ha sido en las últimas décadas cuando el MEF ha experimentado un gran avance debido a los avances informáticos y a la implementación del MEF en los ordenadores.

5.1. Principios básicos del MEF

Como ya se ha mencionado anteriormente, el método de los elementos finitos consiste en transformar un medio continuo en una serie de pequeños elementos unidos entre sí. De esta forma se discretiza el sistema. Estos elementos pueden ser puntos, líneas o planos de distintas formas, pero es importante que sean lo suficientemente pequeños como para que resulte una aproximación aceptable. Los elementos estarán unidos entre sí por sus vértices, llamados nodos [21].

Las ecuaciones que rigen el comportamiento del sistema continuo son ecuaciones diferenciales por sus infinitos grados de libertad, mientras que tras discretizar se tiene un número determinado de grados de libertad y por tanto un sistema de ecuaciones, lineales o no, sensiblemente más fáciles de resolver que las diferenciales.

Los elementos creados en el proceso de discretización tienen definido su comportamiento mediante ecuaciones lineales, restringiendo su evolución a una línea recta. Esto solo es válido para elementos infinitamente pequeños. De este modo, cualquier incógnita que implique una ecuación no lineal, como por ejemplo el comportamiento no lineal de un material, deberá ser resuelto gradualmente de forma lineal.

El método de elementos finitos toma el sistema discretizado y a partir de las condiciones de contorno, dicho sistema evoluciona hasta el estado final. Durante este proceso, el programa resuelve las incógnitas que se le hayan planteado.

Un aspecto clave para comprender el método es la interpolación. El método de los elementos finitos es capaz de calcular las incógnitas requeridas en los nodos que se hayan creado, y a partir de ahí aproximará los resultados a todos los puntos del sistema continuo teniendo en cuenta el valor que toman en los nodos adyacentes [22].

El método de los elementos finitos formula el problema en forma matricial debido a la facilidad que presentan las matrices para ser tratadas por los ordenadores. Para ello es necesario conocer las matrices que definen el comportamiento de los elementos y resolver los grados de libertad que estas presenten.

5.2. Problemas no lineales

Es evidente que un problema que se rige por ecuaciones lineales va a ser más sencillo de resolver que uno que implique comportamientos no lineales. Un ejemplo claro de esto sería la curva de tensión – deformación de un material elástico. Dicha curva sería lineal hasta el punto en el que se alcance el límite elástico, y a partir de dicho punto la curva pasaría a ser no lineal.

En este caso, al analizarse una colisión en un vehículo, se tratará de un caso no lineal ya que será necesario observar la evolución de las tensiones y deformaciones sufridas por los componentes del vehículo. Dichos componentes tendrán en su mayoría un comportamiento lineal hasta alcanzar su límite elástico y después un comportamiento no lineal.

En resumen, al entrar el elemento en la zona plástica, el módulo de Young deja de ser constante y el problema deja de ser lineal. Es por tanto, debido a la rigidez cambiante de la estructura, que el sistema va a ser no lineal. A continuación se explicarán las distintas causas que pueden provocar estas no linealidades [22].

5.2.1. Causas relativas al material

Como ya se ha explicado, esta es la principal causa de no linealidad. Esto es debido a las propiedades de los materiales y a su curva de tensión – deformación. Mientras el estado de deformación del material lo sitúe en la zona elástica, el problema será lineal. Sin embargo, una vez que debido a la deformación el material éste alcanza el límite elástico y entra en la zona plástica, el comportamiento del material será no lineal. La figura 5.1 muestra este comportamiento.

Existe otra posibilidad, y es que un elemento (formado en su totalidad por el mismo material) tenga un comportamiento lineal en una zona y un comportamiento no lineal en otra. Esto puede ser debido a una sección no constante, o a una geometría que favorezca una acumulación de tensiones en un punto. En ese caso se produciría una plastificación en esta zona, y un comportamiento elástico en el resto. Se puede apreciar este fenómeno en la figura 5.2.



Figura 5. 1 Material elástico (izda.) y material con comportamiento plástico (dcha.).



Figura 5. 2 Plastificación: Comportamiento no lineal de la estructura.

5.2.2. Causas geométricas

Otras causas geométricas de no linealidad son los grandes desplazamientos o rotaciones sufridos por los elementos en relación con sus dimensiones más pequeñas, o deformaciones significativas.

5.2.3. Causas relacionada con los elementos

Es posible que las no linealidades del problema vengan dadas por elemento especiales como amortiguadores o muelles que estén así definidos. Este caso es el mismo que el de los cables, que pueden soportar esfuerzos a tracción pero no a compresión.

Otra causa de no linealidad característica de los problemas de colisiones son los contactos entre elementos. Un elemento sigue una trayectoria con una velocidad determinada hasta que impacta con otro y se produce el contacto, momento en el cual se produce la discontinuidad.

5.3. LS – Dyna

LS-Dyna es un software de elementos finitos de propósito general capaz de simular problemas complejos del mundo real. Su uso está extendido en las industrias automovilística, aeroespacial, construcción o militar. LS-DYNA es un software desarrollado por la empresa *Livermore Software Technology Corporation* (LSTC) [23].

LS-Dyna nace como continuación del software de elementos finitos DYNA3D. Durante la década de los 70, DYNA3D fue desarrollado en el *Lawrence Livermore National Laboratory* (LLNL) para simular el impacto de ciertos tipos de armas nucleares. Aunque el estudio del impacto de este tipo de armas dejó de ser relevante, el desarrollo del software continuó hasta dar lugar a un software capaz de simular problemas no lineales a través de la integración explícita de sus ecuaciones. Desde entonces, este software ha adquirido una gran especialización en el sector automovilístico y en concreto en la simulación de impactos. En las figuras 5.3 Y 5.4 se muestran problemas simulados con LS-Dyna.



Figura 5. 3 Simulación de un impacto frontal con LS-Dyna.

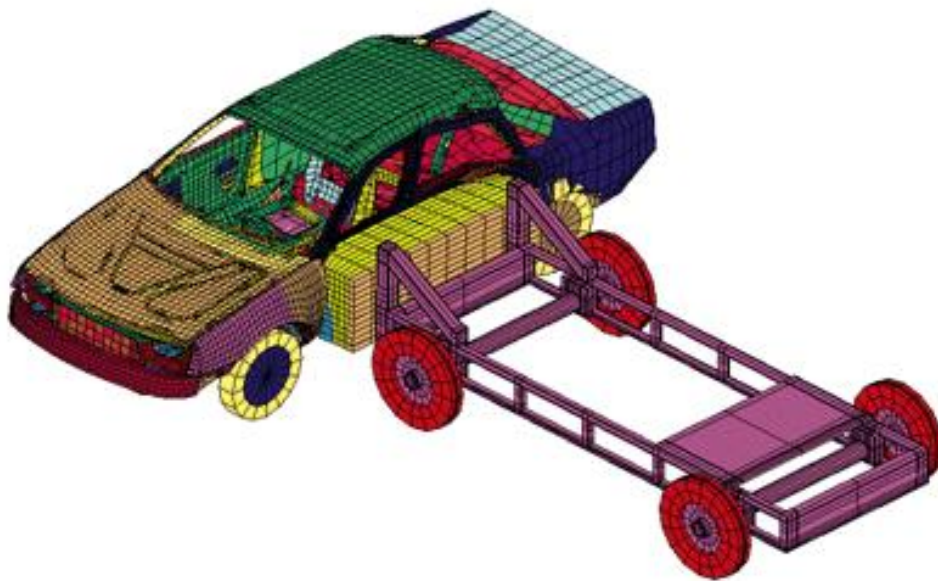


Figura 5. 4 Simulación de un impacto lateral con LS-Dyna.

La metodología de resolución de LS-Dyna es la integración explícita. Unos algoritmos de impacto y contacto permiten tratar problemas complejos de la realidad y hace que no sea necesario mallar las zonas de transición para obtener resultados fiables. LS-Dyna puede resolver problemas en los que se tiene contacto con fluidos o transferencia de calor.

En los últimos años, LS-Dyna se ha especializado en la industria de la automoción. Sus algoritmos hacen de LS-Dyna una herramienta capaz de simular con gran fidelidad problemas que conlleven impactos, altas

velocidades y grandes deformaciones. Esto ha provocado que a día de hoy sea ampliamente utilizado por empresas y universidades de todo el mundo para lograr avances en el campo de la seguridad vial. Sin embargo, también se utiliza para simular problemas de la ingeniería como pueden ser mecanizado de materiales, pruebas de caída, explosivos o análisis sísmico.

LS-Dyna es un programa de procesado, lo que significa que será necesario un programa con el que crear el problema e introducir los datos y variables de entrada (pre-procesador) y otro con el que visualizar, analizar e interpretar los datos de salida (post-procesador). LS-Dyna trabaja con el programa LS-PrePost, software que hace las funciones de pre-procesador y post-procesador en cada momento. Su interfaz es intuitiva y sus menús están organizados por secciones de modo que en cada fase del proyecto se utilizan las opciones de un menú.

Cuando se usa como pre-procesador, LS-PrePost cuenta con una gran librería de materiales (metales, cristales, fluidos viscosos...) y de elementos. Además posee una gran cantidad de algoritmos de contacto para poder simular con gran realismo cada situación. También permite introducir en el problema, como se puede ver en las siguientes figuras, elementos típicos de la automoción, tales como airbags (figura 5.5), cinturones de seguridad (figura 5.6), pretensores, retractores, anillas, sensores, *dummies* (figura 5.7), impactadores y acelerómetros.

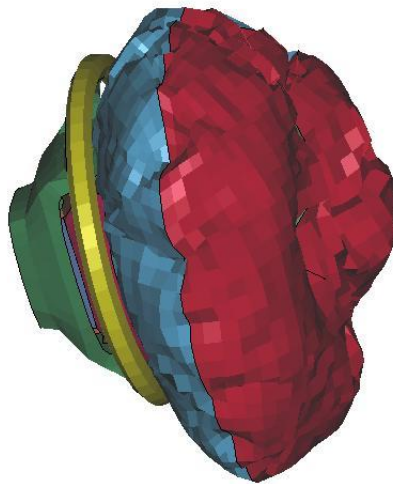


Figura 5. 5 Airbag modelado en LS-PrePost.

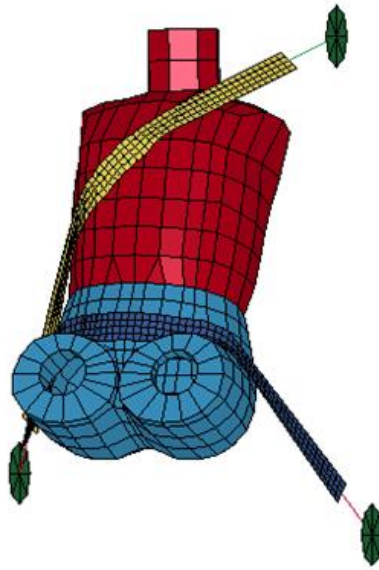


Figura 5. 6 Cinturón de seguridad modelado en LS-PrePost.



Figura 5. 7 Dummy modelado en LS-PrePost.

Como post-procesador, LS-PrePost permite visualizar gráficas de velocidades, aceleraciones, tensiones de Von-Misses, animaciones 3D, etc. También calcula parámetros como el HIC (*Head InjuryCriterion*) y CSI (*ChestSeverityIndex*) que permiten evaluar el nivel de daños en la cabeza y

en el tórax, respectivamente. A continuación, en la figura 5.8 se muestra una gráfica de aceleración de LS-PrePost [24].

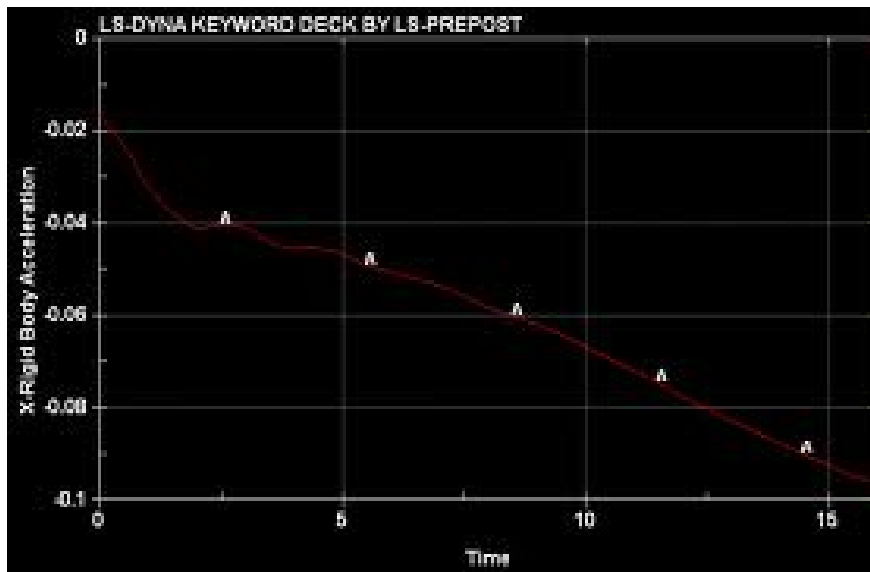


Figura 5. 8 Ejemplo de gráfica visualizada en LS-PrePost.

6 PROTOCOLO DE **ENSAYO DE** **IMPACTO** **LATERAL CONTRA** **UN POSTE**

En la actualidad no se contempla este ensayo entre los incluidos en la directiva europea de homologación de vehículos nuevos. Sin embargo EuroNCAP tiene su propio protocolo de ensayo para garantizar que todos los ensayos tienen lugar bajo las mismas condiciones para todos los vehículos. Este protocolo es el que se explica a continuación y el que se seguirá para implementar el ensayo en el programa LS-Dyna [25].

6.1. Preparación del vehículo

El depósito de combustible debe estar completamente de lleno de combustible o agua. Del mismo modo, el resto de fluidos del coche deben estar en su nivel máximo.

La rueda de repuesto y las herramientas incluidas de serie en vehículo deben estar alojadas en su correspondiente lugar.

La presión de las ruedas debe ser la indicada en las instrucciones del fabricante.

Los asientos delanteros deben colocarse en la posición media.

Se ha de marcar una línea vertical en el lado del conductor que será la línea sobre la que impacte el poste. Esta línea corresponde a la intersección del coche con el plano transversal vertical que atraviesa el centro de gravedad de la cabeza del *dummy*.

6.2. *Dummy*

Se utiliza un *dummy* para ensayo lateral. El *dummy* es un ES-2. Este modelo es la evolución del *dummy* EuroSID1, el cual incorpora numerosas mejoras. El ES-2 fue desarrollado por el programa SID2000, un consorcio de investigadores europeos, fabricantes de coches y fabricantes de *dummies*.

El *dummy* cuenta con la siguiente instrumentación:

| Localización | Parámetro | Amplitud mínima |
|-----------------|-----------------------|-----------------|
| Cabeza | Aceleraciones (X,Y,Z) | 250g |
| Hombro | Fuerzas (X,Y,Z) | 8kN |
| Tórax T1 | Aceleraciones (X,Y,Z) | 200g |
| Tórax T12 | Aceleraciones (Y) | 200g |
| Costillas | Aceleraciones (Y) | 700g |
| | Desplazamiento | 90mm |
| Abdomen | Fuerzas (X,Y) | 5kN |
| Espalda | Fuerzas (Y) | 5kN |
| | Momentos (X,Y) | 200Nm |
| Vertebra T12 | Fuerzas (X,Y) | 5kN |
| | Momentos (X,Y) | 300Nm |
| Pelvis | Aceleraciones (X,Y,Z) | 150g |
| Sínfisis púbica | Fuerzas (Y) | 20kN |
| Fémur | Fuerzas (X,Y,Z) | 22kN |
| | Momentos (X,Y,Z) | 350Nm |

Tabla 6. 1 Instrumentación del Dummy.

El coche por su parte también debe llevar instalado un acelerómetro que mida aceleración en el eje Y. Este acelerómetro debe ir situado sobre el panel B del lado contrario al golpeado y debe tener una amplitud mínima 350g.

6.3. Condiciones de ensayo

El coche se coloca sobre una plataforma desplazable, que será la que se lance de manera perpendicular al poste por el lado del conductor. Esta plataforma se lanzará una velocidad de 29 km/h. Durante la fase de aceleración del test, la aceleración no debe sobrepasar 1,5 m/s².

El poste sobre el que impacta el coche debe tener 254 mm ±3 mm de diámetro. Su extremo inferior no debe sobrepasar en más de 102 mm el punto más bajo de los neumáticos.

El ángulo con el que el coche debe impactar es de 90°±3°.

6.4. Cálculo de los criterios de lesiones

6.4.1. Cabeza

Se debe calcular la aceleración resultante (A_R) a partir de las componentes X, Y y Z de la aceleración medida en la cabeza, una vez que estas han sido filtradas a 1000Hz.

$$A_R = \sqrt{A_X^2 + A_Y^2 + A_Z^2}$$

A continuación se procede a calcular el HIC:

$$HIC = (t_2 - t_1) \cdot \left[\frac{\int_{t_1}^{t_2} A_R \cdot dt}{(t_2 - t_1)} \right]^{2,5}$$

Donde los instantes de tiempo t_1 y t_2 son dos instantes que maximizan el valor del HIC.

El valor de la aceleración resultante debe ir expresado en g.

6.4.2. Costillas

El valor a calcular será el criterio viscoso. Este parámetro se calcula a partir de la fórmula:

$$CriterioViscoso(t) = V(t) \cdot C(t)$$

Donde $C(t)$ es la compresión de las costillas y depende de la deformación instantánea de las mismas, $D(t)$. Se calcula como sigue:

$$C(t) = \frac{D(t)}{0,140}$$

$V(t)$ es la velocidad de deformación y se calcula como el diferencial de la deformación con respecto del tiempo:

$$V(t) = \frac{8 \cdot [D(t+1) - D(t-1)] - [D(t+2) - D(t-2)]}{12 \cdot \delta_t}$$

Donde δ_t es el intervalo de tiempo entre dos muestras digitales de deformación.

Para determinar el valor del criterio viscoso se calcula de manera continua y se determina su valor máximo.

6.4.3. Abdomen

Se calcula la fuerza resultante en el abdomen como resultado de la suma de las fuerzas registradas en los dinamómetros, una vez que estas han sido filtradas a 600Hz.

6.4.4. Pelvis

Se determina la máxima aceleración de la pelvis, filtrando este valor a una frecuencia de 180 Hz.

6.4.5. Sínfisis púbica

Se determina el valor máximo de la fuerza lateral medida en la sínfisis púbica, filtrando dicho valor a una frecuencia de 600 Hz.

7 MODELOS DE LA SIMULACIÓN

En el presente proyecto se han utilizado modelos obtenidos de la página web de la *National Crash Analysis Center* [3]. La simulación de los ensayos se ha llevado a cabo mediante el programa LS-Dyna. Como ya se mencionó en el capítulo 5, este software no utiliza unidades, por lo que es imprescindible seguir un criterio a la hora de introducir los distintos valores, para que estos sean coherentes entre sí.

En este proyecto, se ha seguido el siguiente criterio de unidades:

| Magnitud | Unidades |
|-----------------|-----------------|
| Longitud | Milímetros (mm) |
| Tiempo | Segundos (s) |
| Masa | Toneladas (Tn) |

Tabla 7. 1 Criterio de Unidades.

A continuación se detallan cada uno de los modelos empleados en la simulación, así como el proceso de implementación de cada ensayo.

7.1. Coche

El coche utilizado en este proyecto es un Geo Metro. Bajo este nombre se comercializó en Norteamérica esta segunda generación del Suzuki Cultus o Suzuki Swift, diseñado sobre la plataforma M del grupo

General Motors. Este vehículo se vendió entre los años 1995 y 2001 en versiones de 3, 4 y 5 puertas.

El modelo de la NCAC, el cual se muestra en la figura 7.1, fue desarrollado en el año 2000. Este modelo cuenta con 205 partes y un total de 16100 elementos.

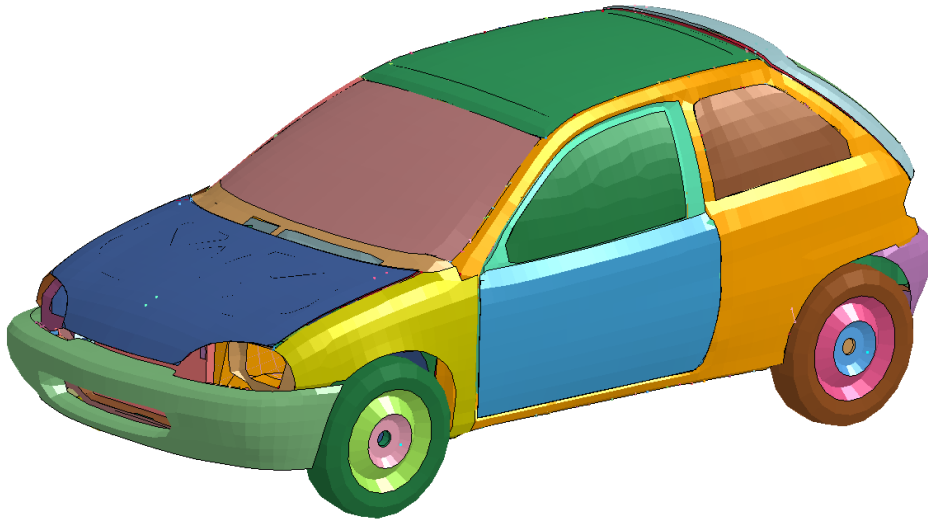


Figura 7. 1 Modelo del vehículo.

7.1.1. Geometría

En este modelo, la mayoría de los elementos son del tipo SHELL, ya que simulan la chapa del vehículo. Así, encontramos puertas, paragolpes, portón, neumáticos, etc. En el modelo podemos diferenciar elementos que aportan una gran rigidez estructural (largueros, pilares A, b y C, etc.), los cuales se muestran en la figura 7.2, y otros como las chapa externa de las puertas o el techo que no cumplen con ninguna función estructural.



Figura 7. 2 Vista de los elementos estructurales del modelo.

El contacto definido entre las distintas partes del coche es un AUTOMATIC SINGLE SURFACE, y está definido sobre el SET PART número 5, que engloba todas las partes del coche.

Este comando permite simular de forma sencilla el contacto entre todos los elementos que formen el SET PART correspondiente, aunque inicialmente no estén en contacto.

Este modelo sin embargo no incluye asientos, por lo que se optó por incluir los asientos del Ford Taurus desarrollado por la NCAC. Estos asientos son dobles, es decir, el archivo incluye el asiento del conductor y el del acompañante. Está formado por 4 partes tipo SHELL, y sus uniones con el suelo del coche están realizadas con el comando CONSTRAINED NODAL RIGID BODY.

El comando CONSTRAINED NODAL RIGID BODY establece unas uniones fijas entre los puntos en los que se selecciona. De esta forma, la distancia relativa entre estos puntos nunca va a variar, aunque no exista ningún elemento real entre ellos.

En cada asiento se han seleccionado cuatro nodos de su base, uno en cada esquina, y se ha unido cada uno de ellos a su correspondiente nodo del suelo del coche. Así existen 8 uniones de este tipo entre los asientos y el suelo del coche.

En la figura 7.3 se muestran los asientos extraídos del modelo del Taurus.

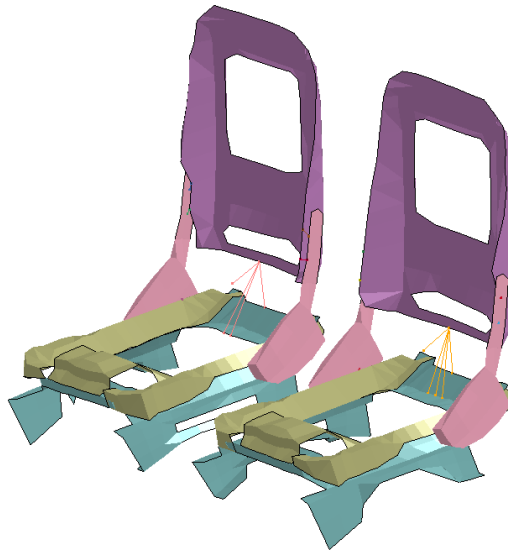


Figura 7. 3 Asientos del modelo Ford Taurus.

7.1.2. Materiales

El material más utilizado en este modelo es tipo **PIECEWISE LINEAR PLASTICITY**. Este tipo de material permite simular el comportamiento elástico de un material hasta que se alcanza el valor del límite elástico. Entonces la tensión y la deformación dejan de ser linealmente dependientes. Tal es el caso del acero, el material más utilizado en este proyecto. Sin embargo también existen otros materiales que siguen el mismo comportamiento. A continuación se muestran las propiedades de los principales materiales del tipo **PIECEWISE LINEAR PLASTICITY** en la tabla 7.2.

| Material PIECEWISE LINEAR PLASTICITY | | |
|--|-----------------------|-------------------------|
| Densidad (Tn/mm ³) | Módulo Elástico (MPa) | Coefficiente de Poisson |
| 7,890E-9 | 2,10E+05 | 0,3 |

Tabla 7. 2 Propiedades del material **PIECEWISE LINEAR PLASTICITY empleado en el vehículo.**

En el coche también existen otro tipo de materiales, como por ejemplo el **RIGID**, que simula un material indeformable. Este es el caso de elementos como los brazos de la suspensión o los discos de freno.

Por otro lado, existen otro tipo de materiales menos utilizados como HONEYCOMB, SPRINGELASTICo DAMPER VISCOUS, entre otros.

En el caso de los asientos, tan solo se tiene el modelado de la estructura interna, la cual aporta peso y rigidez al conjunto. El material utilizado en el bastidor es acero.

Para simular el comportamiento del acero del interior de los asientos se recurre de nuevo al material del tipo PICEWISE LINEAR PLASTICITY, cuyas propiedades se muestran en la tabla 7.3.

| Material PICEWISE LINEAR PLASTICITY | | |
|-------------------------------------|-----------------------|-------------------------|
| Densidad (Tn/mm ³) | Módulo Elástico (MPa) | Coefficiente de Poisson |
| 7,850E-9 | 2,00E+05 | 0,3 |

Tabla 7. 3 Propiedades del material *PIECEWISE LINEAR PLASTICITY* empleado en el bastidor de los asientos.

El acolchado de los asientos carece de importancia en cuanto a peso o rigidez, por lo que no se modela.

Este relleno de espuma que tienen los asientos, sí que cumple otra función, y es la de sujetar al *dummy* y oponer una cierta resistencia a su deslizamiento. Esto se conseguiría programando un contacto entre el *dummy* y el coche del tipo RIGID BODY ONE WAY TO RIGID BODY, y definiendo una curva que relacione la distancia penetrada con la fuerza normal ejercida (y por tanto, también la de rozamiento). Como el objetivo de este proyecto no contempla la introducción de ningún *dummy* en el coche, no es necesario llevar a cabo esta tarea.

7.1.3. Gravedad

En el modelo del vehículo es necesario introducir el parámetro de la aceleración de la gravedad. Este valor tendrá la dirección del eje Z, y sentido negativo del mismo, es decir, hacia abajo. El valor de la gravedad es 9,81 m/s² por lo que teniendo en cuenta las unidades que se han definido al principio de este apartado, será necesario introducir un valor de 9810. De esta forma se introduce en las unidades del problema, que son mm/s².

Para implementar la aceleración en el problema se introduce el comando LOAD BODY Z.

7.1.4. Acelerómetros

Este modelo de vehículo solo incorpora un acelerómetro. Dicho elemento se encuentra situado en el centro de gravedad, y será el encargado de proporcionar información acerca de las aceleraciones a las que está sometido el coche en todo momento. Puede medir aceleraciones positivas y negativas en los tres ejes del problema. En la figura 7.4 se muestra una vista en la que se puede apreciar el acelerómetro situado en el centro de gravedad del vehículo y sus tres ejes de medición.

Es posible crear un acelerómetro a través del comando ELEMENT SEATBELT ACCELEROMETER, introduciendo el nodo en el que irá situado y la dirección de los ejes de medición.

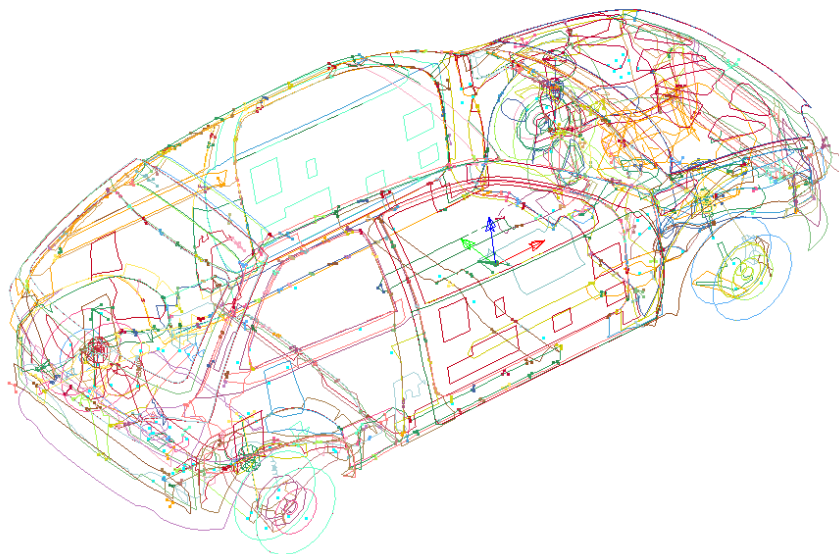


Figura 7. 4 Posición del acelerómetro del vehículo

7.1.5. Muelles

Como ya se explicó en la introducción del proyecto, el objetivo del mismo es medir tanto las aceleraciones sufridas en el interior del vehículo, como la deformación producida sobre el mismo.

Para que LS-Dyna mida aceleraciones, es necesario dotar al modelo de acelerómetros. Sin embargo, para medir la deformación producida por el

impacto, el programa necesita que exista un muelle en el lugar donde se quiere medir esta deformación.

Por este motivo, se ha incluido un muelle en posición horizontal transversal al vehículo situado entre las dos puertas. De esta forma es posible conocer la distancia inicial y final entre los puntos extremos del muelle, así como la evolución temporal de la misma.

El modelado de este elemento se lleva a cabo mediante la utilización de una sección del tipo DISCRETE y un material del tipo SPRING ELASTIC. Al material se le ha definido con una constante de rigidez muy baja para que la fuerza que ejerza debido a su deformación sea despreciable. Esta constante de rigidez toma un valor de 0,001 N/mm.

El muelle se sitúa entre los nodos 147223 y 148223. Estos nodos pertenecen a la sección interior de las puertas, a una altura media de las mismas y situados en una posición ligeramente adelantada al asiento, puesto que esta sería la posición que ocuparía el conductor, y es donde la deformación sufrida es de gran importancia.

En la figura 7.5 se muestra el muelle creado entre las puertas del vehículo.



Figura 7. 5 Detalle del muelle entre las puertas del modelo.

7.1.6. Contactos

El modelo cuenta con un contacto tipo AUTOMATIC SINGLE SURFACE definido sobre el SET PART número 5, que engloba todas las partes del coche.

Al estar en el suelo, es necesario definir el contacto entre el coche y un elemento plano del tipo RIGIDWALL PLANAR, que se corresponde con el piso. Este contacto está implícito en la definición de dicho elemento y cuenta con un valor de coeficiente de fricción de 0,8, que es el correspondiente a un asfalto normal seco con neumáticos nuevos [26].

7.2. Bogie

El primer ensayo es el de impacto lateral de un vehículo contra otro vehículo. Es necesario por tanto otro modelo que simule la barrera deformable móvil que se utiliza en los ensayos reales. Para ello se recurre al modelo que se encuentra en la página de la NCAC y que simula un *bogie*. Dicho modelo se puede ver en la figura 7.6.

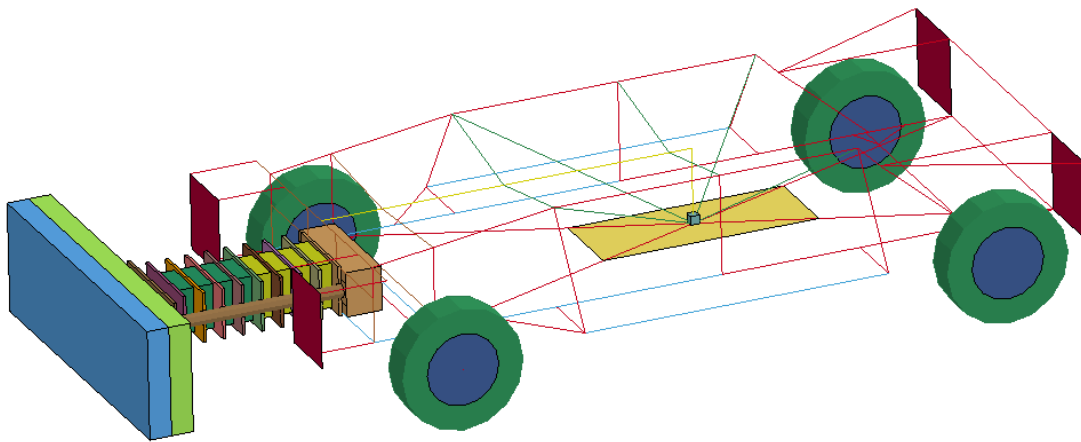


Figura 7. 6 Modelo del bogie.

Este modelo cuenta con una barrera de material deformable instalada sobre dos vástagos que se introducen por sus guías al colisionar, amortiguando así el impacto. Lo que se simula de esta forma es la deformación que sufriría el coche que impacta por el lateral al otro.

7.2.1. Geometría

El modelo está construido sobre un chasis tubular, cuenta con cuatro ruedas y una barrera deformable. Dicha barrera se desplaza hacia dentro del *bogie* cuando impacta, y en su recorrido cuenta con distintos elementos que amortiguan el impacto.

La barrera de este modelo cuenta con unas dimensiones que no son las admitidas en la normativa europea referente al impacto lateral, por lo que será necesario modificarla. La barrera contaba con una anchura inicial de la barrera de 406mm y una altura de 70mm.

En su lugar se introduce una barrera con unas dimensiones de 1500 mm de anchura y 500 mm de altura, que es lo que indica el reglamento 95 sobre ensayos de choque lateral. Para llevar a cabo este paso se utiliza el comando BOX SOLID, dentro del menú MESH. Para unir esta nueva barrera a las guías se utiliza el comando CONSTRAINED RIGID BODIES siendo la parte MASTER las guías y la parte SLAVE la parte rígida de las creadas. Esta nueva barrera deformable se muestra ya unida a las guías en la figura 7.7.

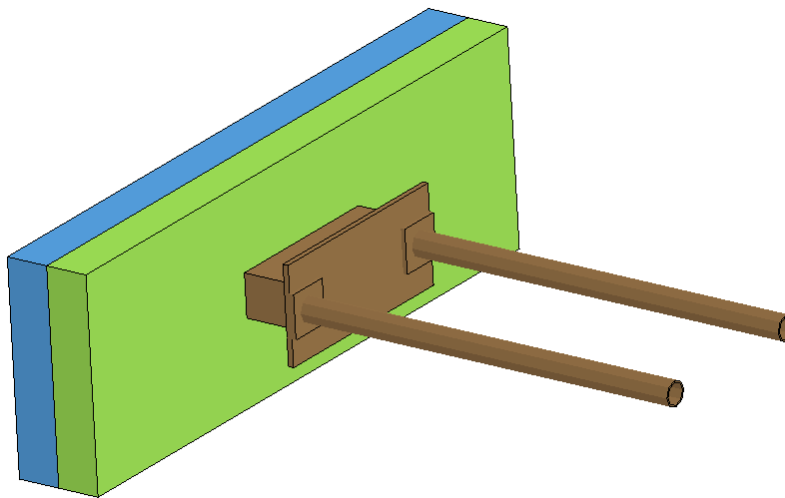


Figura 7. 7 Barrera Deformable.

7.2.2. Materiales

El material del chasis del *bogie* es ELASTIC. Esto es debido a que es el coche y la barrera deformable móvil los que deben absorber la energía del impacto, no el chasis del bogie. Sus características son las descritas en la tabla 7.4.

| Material ELASTIC | | |
|--------------------------------|-----------------------|------------------------|
| Densidad (Tn/mm ³) | Módulo Elástico (MPa) | Coeficiente de Poisson |
| 1,06E-9 | 2,462 E+03 | 0,323 |

Tabla 7. 4 Propiedades del material RIGID empleado en el chasis del bogie.

Para la barrera se han utilizado dos tipos de materiales. El primero es un material del tipo RIGID, que actúa de soporte para la barrera. A esta parte es donde se unen los vástagos del *bogie*. Por el otro lado, el material de la barrera es HONEYCOMB, ya que será la parte que impacte contra el coche, y debe ser deformable.

A continuación se muestran las características de estos materiales en la tabla 7.5.

| Material RIGID | | |
|--------------------------------|-----------------------|------------------------|
| Densidad (Tn/mm ³) | Módulo Elástico (MPa) | Coeficiente de Poisson |
| 2,36E-09 | 2,00E+05 | 0,3 |
| Material HONEYCOMB | | |
| Densidad (Tn/mm ³) | Módulo Elástico (MPa) | Coeficiente de Poisson |
| 1,60E-11 | 6,90E+04 | 0,33 |

Tabla 7. 5 Propiedades de los materiales RIGID y HONEYCOMB empleados en la barrera.

7.2.3. Velocidad inicial

En el ensayo de impacto lateral de un vehículo contra otro vehículo se establece una velocidad inicial para la barrera deformable móvil de 50 km/h. Esta velocidad expresada en las unidades de este problema es de $13,889 \cdot 10^3$ mm/s. Este valor se introduce en el modelo a través del comando INITIAL VELOCITY GENERATION. Se ha escogido este comando

por la significativa disminución en el tiempo de cálculo respecto al comando INITIAL VELOCITY.

La velocidad del *bogie* se impone en el eje Y del sistema, con sentido negativo, ya que de esa forma se acercará al coche por el lado del conductor.

7.2.4. Gravedad

De nuevo se introduce el valor de la aceleración de la gravedad al *bogie*. Este valor será de -9810 mm/s^2 en la dirección Z.

7.2.5. Acelerómetros

El modelo del impactador posee 2 acelerómetros, el primero situado en el centro de gravedad del mismo y el segundo situado en la propia barrera móvil. Sin embargo, ninguno de los dos va a ser necesarios en este proyecto, ya que el objetivo es medir la aceleración experimentada por el coche. En la figura 7.8 se aprecian ambos acelerómetros.

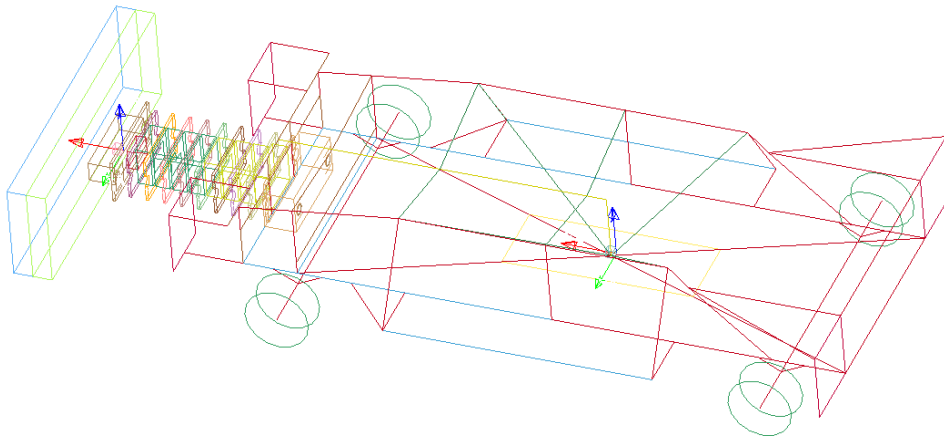


Figura 7. 8 Acelerómetros del bogie.

7.2.6. Contactos

Para definir el contacto entre el coche y el bogie se establece un contacto del tipo AUTOMATIC SURFACE TO SURFACE, en el que se determinan unos coeficientes rozamiento estático y dinámico de 0,8 y 0,4

respectivamente. En la figura 7.9 se muestra el modelo del coche junto con el del *bogie*.

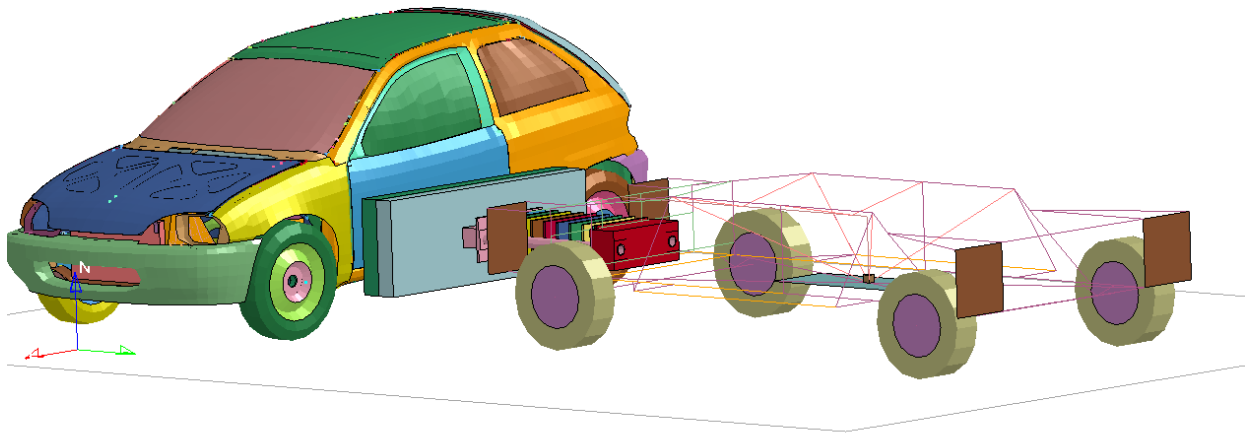


Figura 7. 9 Modelo del coche con bogie.

7.3. Poste

El segundo ensayo será el de impacto lateral contra un poste. El modelo del poste se ha obtenido de la página web de la NCAC [3] y se muestra en la figura 7.10.

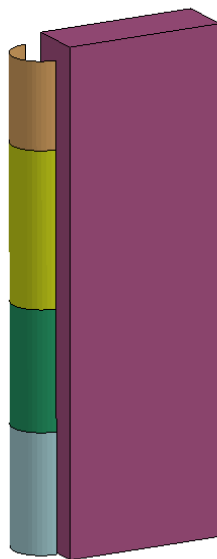


Figura 7. 10 Poste simulado por ordenador.

7.3.1. Geometría

Este modelo está formado en su mayoría por elementos tipo SHELL. Consiste en un bloque macizo vertical que sirve de soporte para otras cuatro planchas curvas, que puestas una a continuación de otra, simulan la sección de un poste.

7.3.2. Materiales

Los materiales utilizados en este modelo son todos del tipo RIGID. Esto es debido a que el poste no se debe deformar en el ensayo, ya que se trata de evaluar la deformación sufrida por el coche y la capacidad del mismo para absorber la energía del impacto. Las propiedades de este material RIGID se muestran en la tabla 7.6.

| Material RIGID | | |
|--------------------------------|-----------------------|-------------------------|
| Densidad (Tn/mm ³) | Módulo Elástico (MPa) | Coefficiente de Poisson |
| 7,860E-9 | 2,10E+05 | 0,3 |

Tabla 7. 6 Propiedades del material RIGID empleado en el poste.

7.3.3. Velocidad inicial

En este ensayo el poste carece de velocidad inicial. Es el coche el que se lanza contra el poste a una velocidad inicial de 29 km/h , lo que expresado en las unidades del problema equivale a $8,055 \cdot 10^3$ mm/s. Esta velocidad se establece en el sentido positivo del eje Y, para que el coche se aproxime al poste de forma lateral y por el lado del conductor.

7.3.4. Gravedad

Del mismo modo que se explicó para el coche o el *bogie*, el modelo del poste también cuenta con la aceleración de la gravedad impuesta en el sentido negativo del eje Z con un valor de 9810 mm/s^2 .

7.3.5. Contactos

Tan solo es necesario definir el contacto entre el poste y el vehículo. Para ello se incluye el poste en el mismo SET PART que el coche, el cual ya tiene asignado un contacto AUTOMATIC SINGLE SURFACE. En la figura 7.11 se muestra el modelo final, con el coche y el poste incluidos.

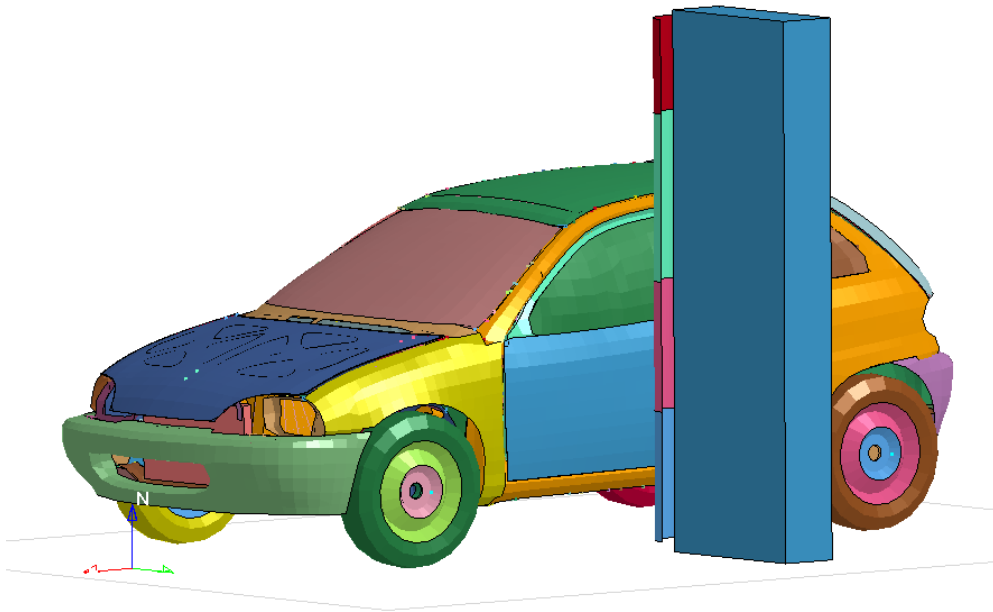


Figura 7. 11 Modelo del coche con poste.

8 RESULTADOS

En el presente capítulo se analizan los resultados obtenidos en las simulaciones de los ensayos de choque. Se tienen en cuenta los valores de aceleración obtenidos del acelerómetro incluido en el interior del coche, así como los valores de deformación medidos en la puerta del conductor.

Cuando se implementa una simulación el LS-PrePost, es necesario indicar en el programa qué tipos de datos necesitamos obtener. De esa forma, LS-Dyna procesa el archivo y genera los ficheros necesarios con los datos demandados. Posteriormente, LS-PrePost puede volver a abrir la simulación ya procesada e interpretar los parámetros demandados.

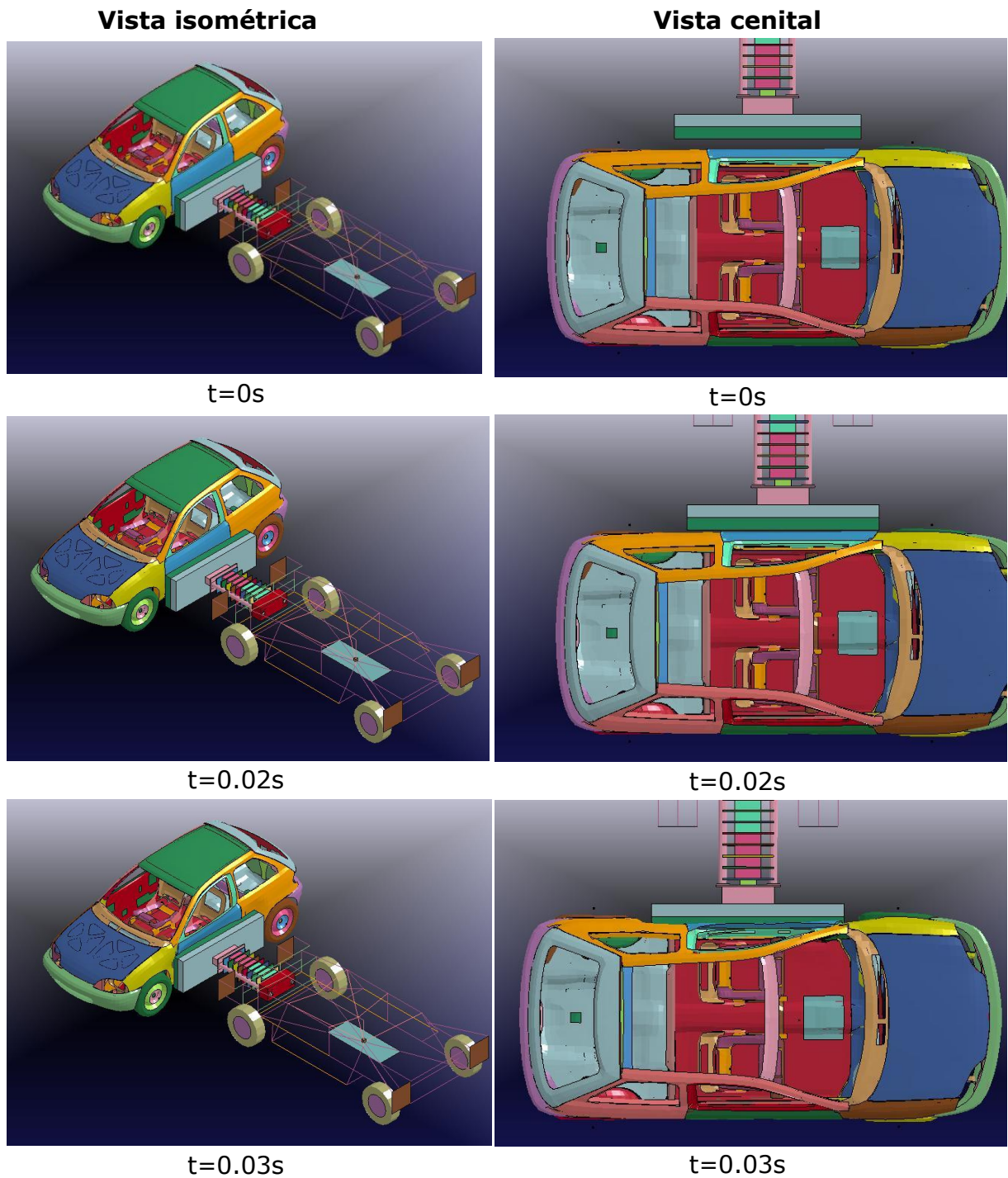
A continuación se muestran los resultados obtenidos en los dos ensayos.

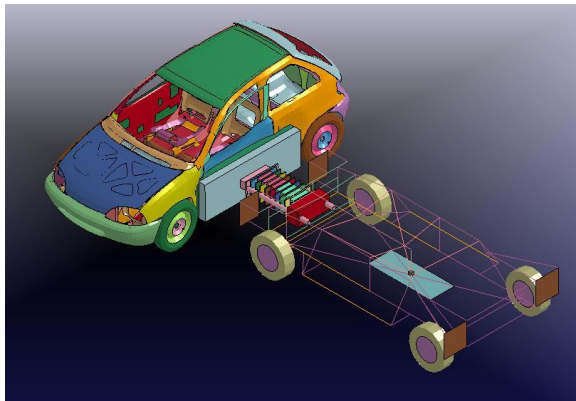
8.1. Impacto lateral de un vehículo contra otro vehículo

Este caso simula un choque lateral entre dos vehículos. Para simularlo, el coche objeto de estudio es golpeado por una barrera deformable instalada sobre un *bogie*. Este *bogie* impacta sobre el vehículo por el lado del conductor a una velocidad de 50 km/h.

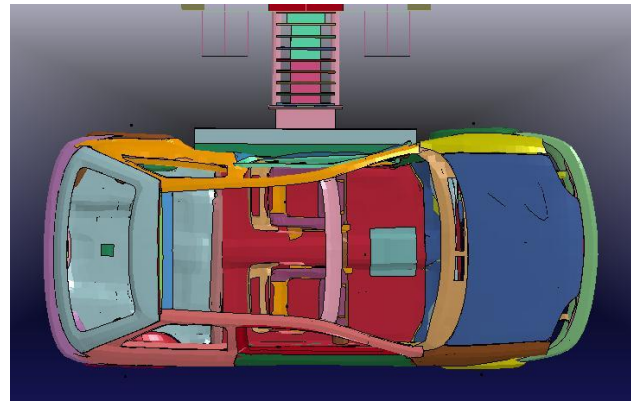
En la tabla 8.1 se muestra la secuencia de imágenes que ilustra la evolución del ensayo.

Tabla 8. 1 Vista isométrica y cenital del exterior del vehículo en el ensayo lateral contra otro vehículo.

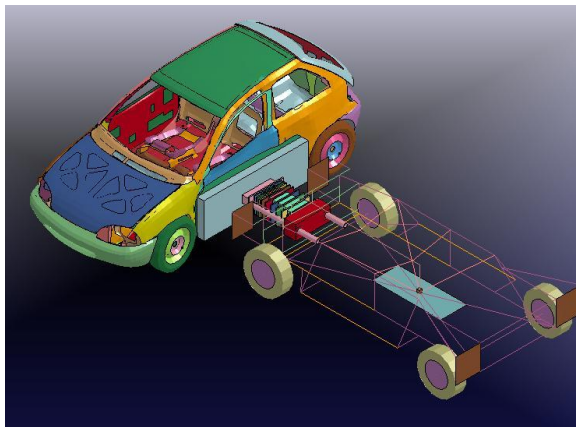




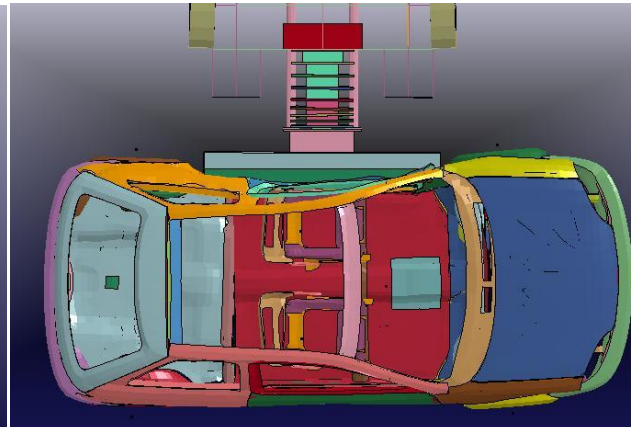
$t=0.04s$



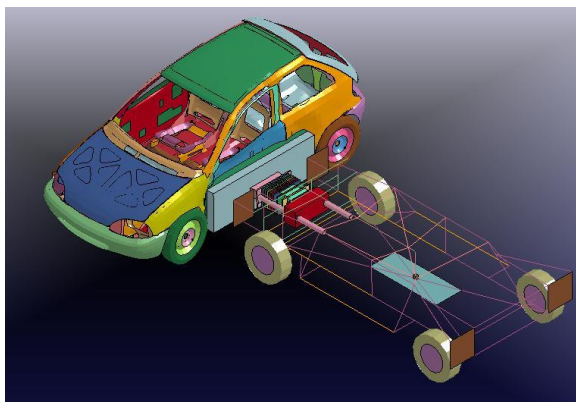
$t=0.04s$



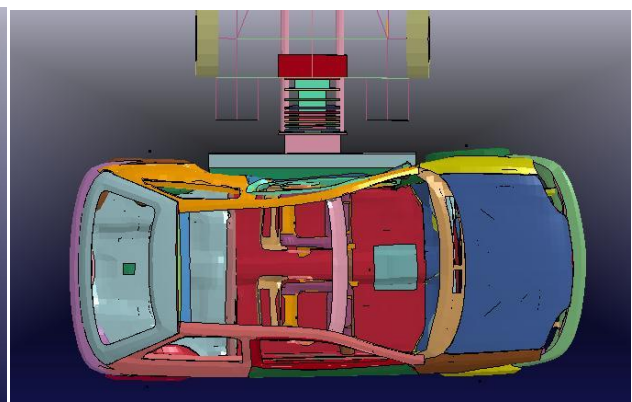
$t=0.05s$



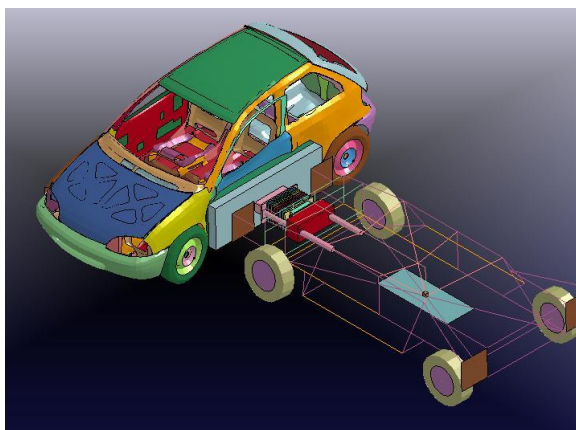
$t=0.05s$



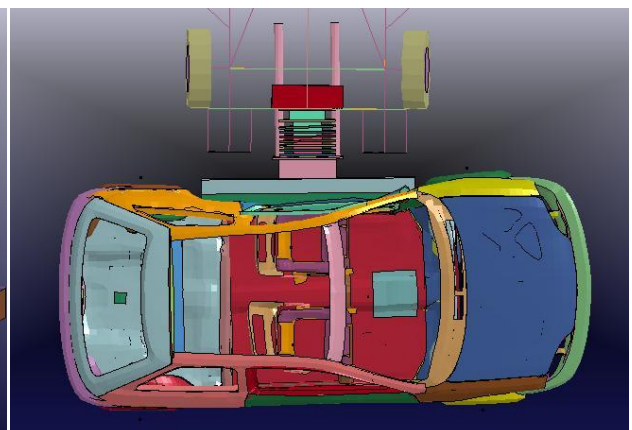
$t=0.06s$



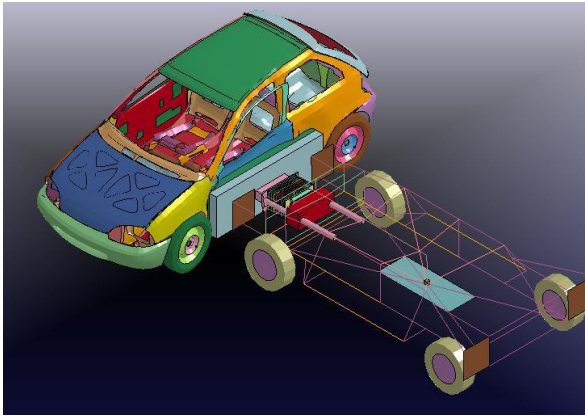
$t=0.06s$



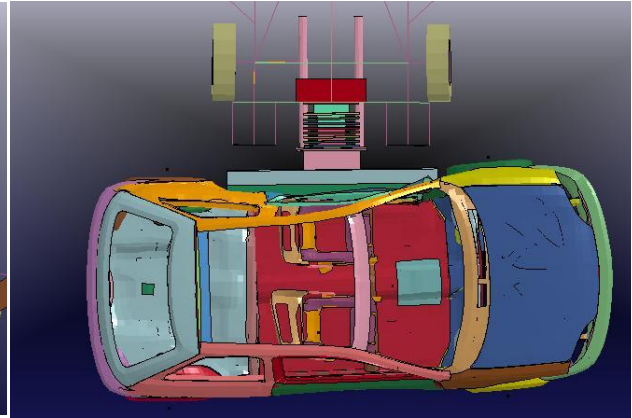
$t=0.07s$



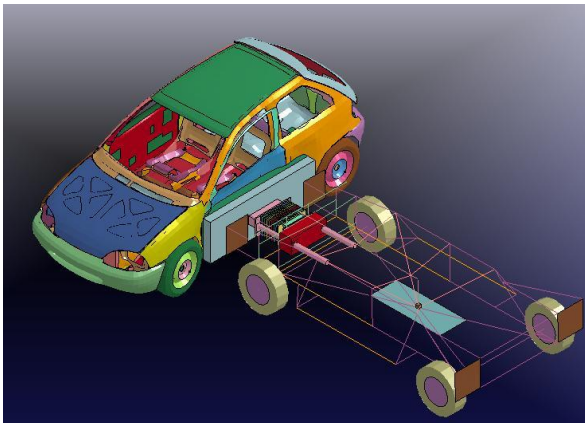
$t=0.07s$



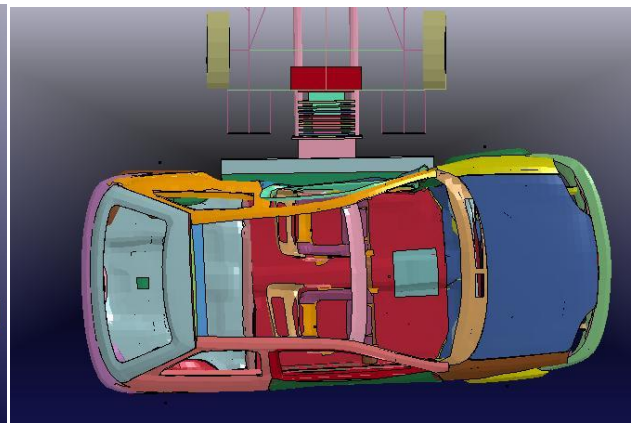
$t=0.08s$



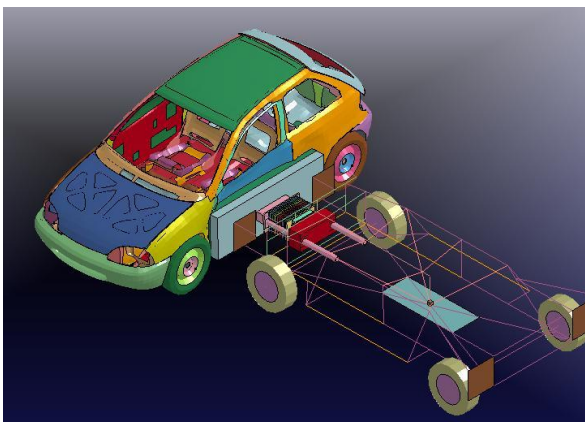
$t=0.08s$



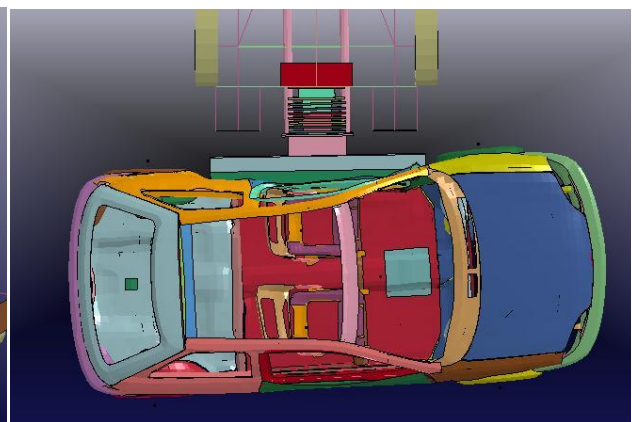
$t=0.09s$



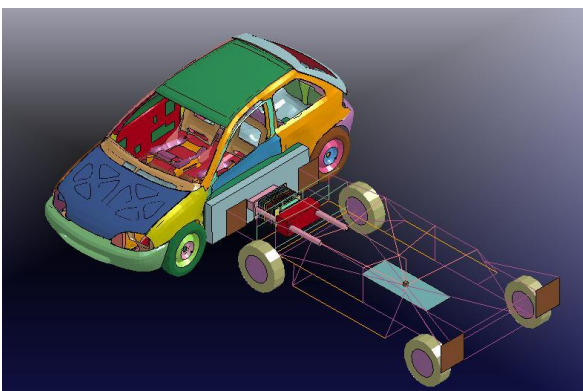
$t=0.09s$



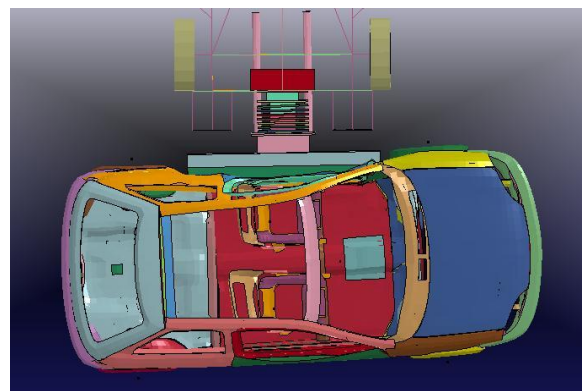
$t=0.10s$



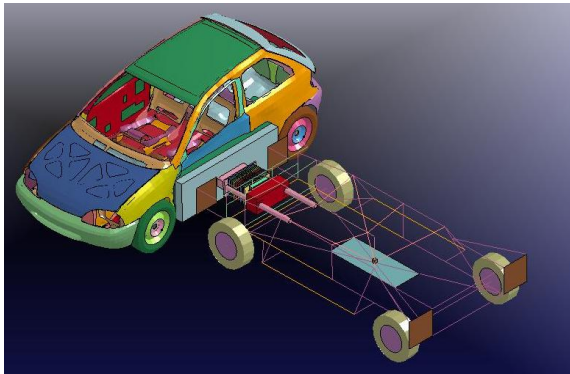
$t=0.10s$



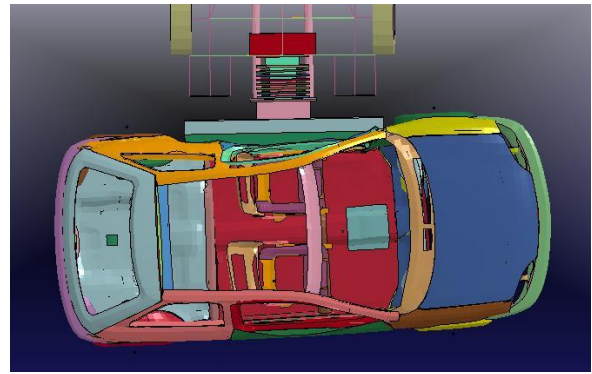
$t=0.11s$



$t=0.11s$



t=0.12s



t=0.12s

En la figura 8.1 se muestran valores de aceleración resultante filtrados a 1000 Hz. Esta gráfica muestra la aceleración medida en mm/s^2 .

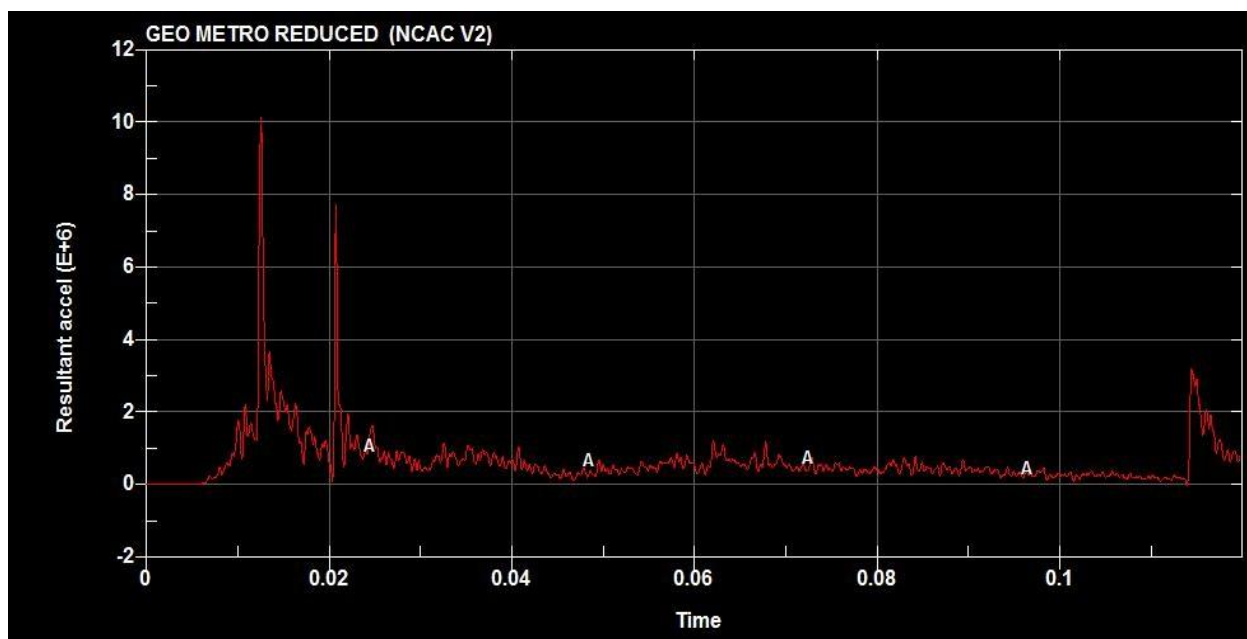


Figura 8. 1 Gráfica de aceleración resultante en el coche en el ensayo contra otro coche.

El máximo valor de aceleración es de $1,0077 \cdot 10^7 \text{ mm/s}^2$, o 10077 m/s^2 expresado en unidades del sistema internacional. Esto quiere decir que el centro de gravedad del coche sufre una aceleración de $1027g$. Este valor de aceleración tiene lugar en el instante $t=0,012 \text{ s}$.

Por otro lado, se extrae la gráfica correspondiente a la variación de longitud del muelle situado entre las dos puertas. Como ya se explicó, este

muelle está situado en la parte superior de la puerta, ligeramente adelantado al asiento, ya que será en esa zona en la que golpee al *dummy*.

La figura 8.2 muestra el resultado.

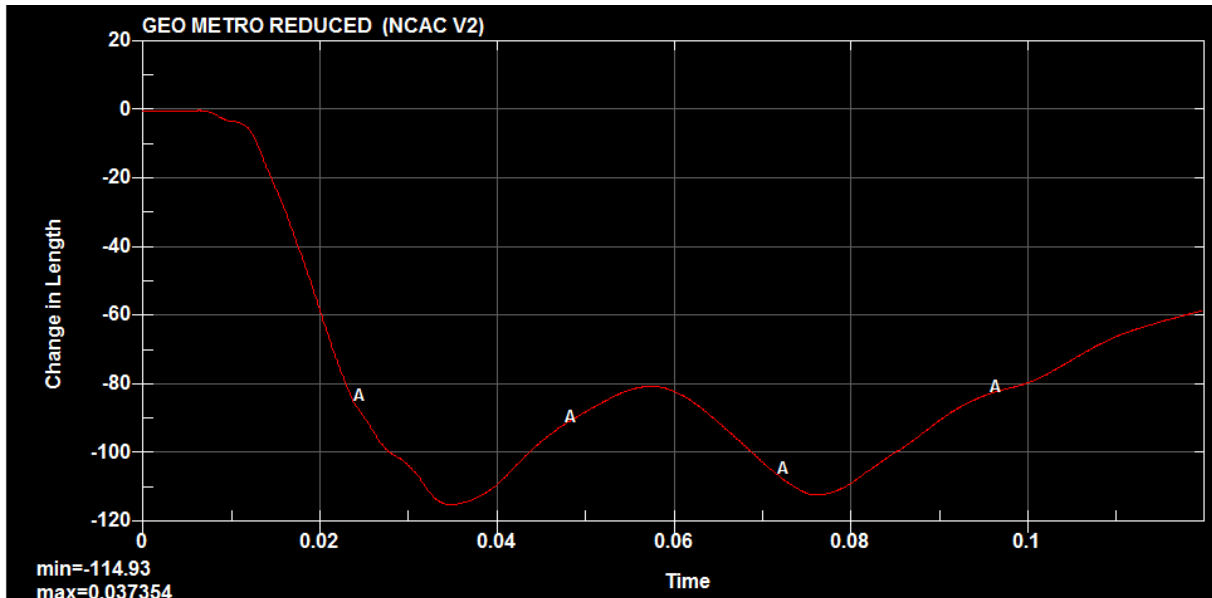


Figura 8. 2 Compresión del muelle. Impacto contra bogie.

La máxima compresión del muelle es de 114,93 mm y se produce en el instante $t=0,034$ s.

La figura 8.3 muestra la evolución de la energía cinética del problema a lo largo del tiempo.

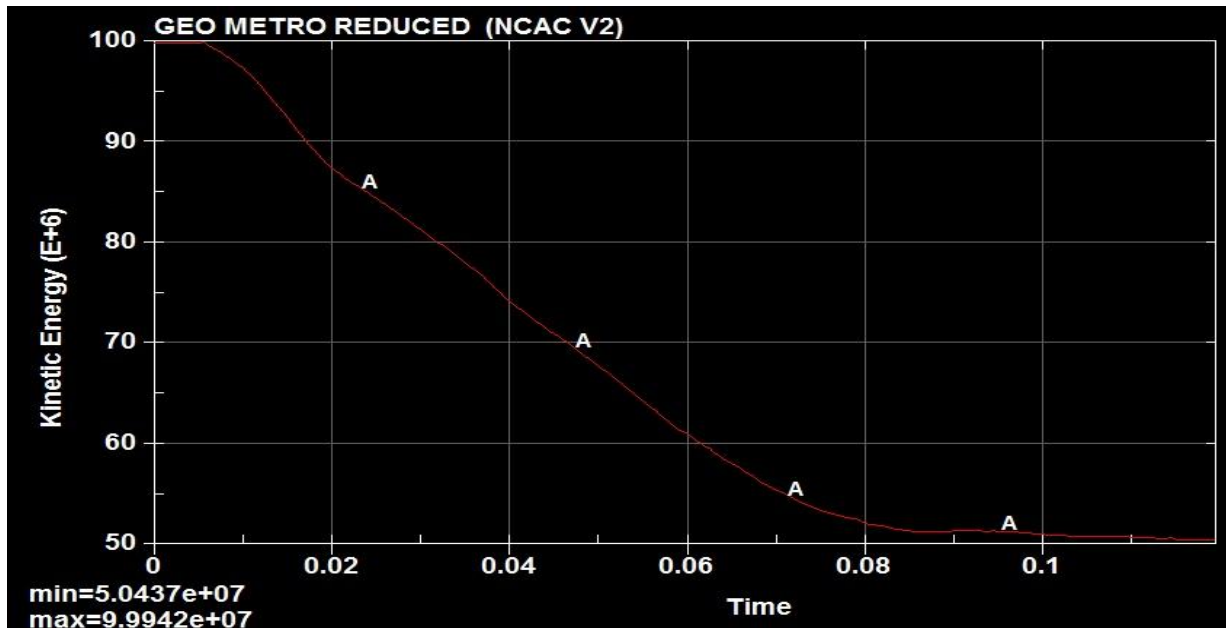


Figura 8. 3 Energía cinética en el vehículo. Impacto contra bodega.

En ella se aprecia cómo la energía inicial del vehículo es de $9,9942 \cdot 10^7$ mJ, o 99942 J en unidades del sistema internacional. La energía cinética máxima tiene lugar en el instante inicial $t=0$ s.

La figura 8.4 muestra la energía absorbida por el vehículo.



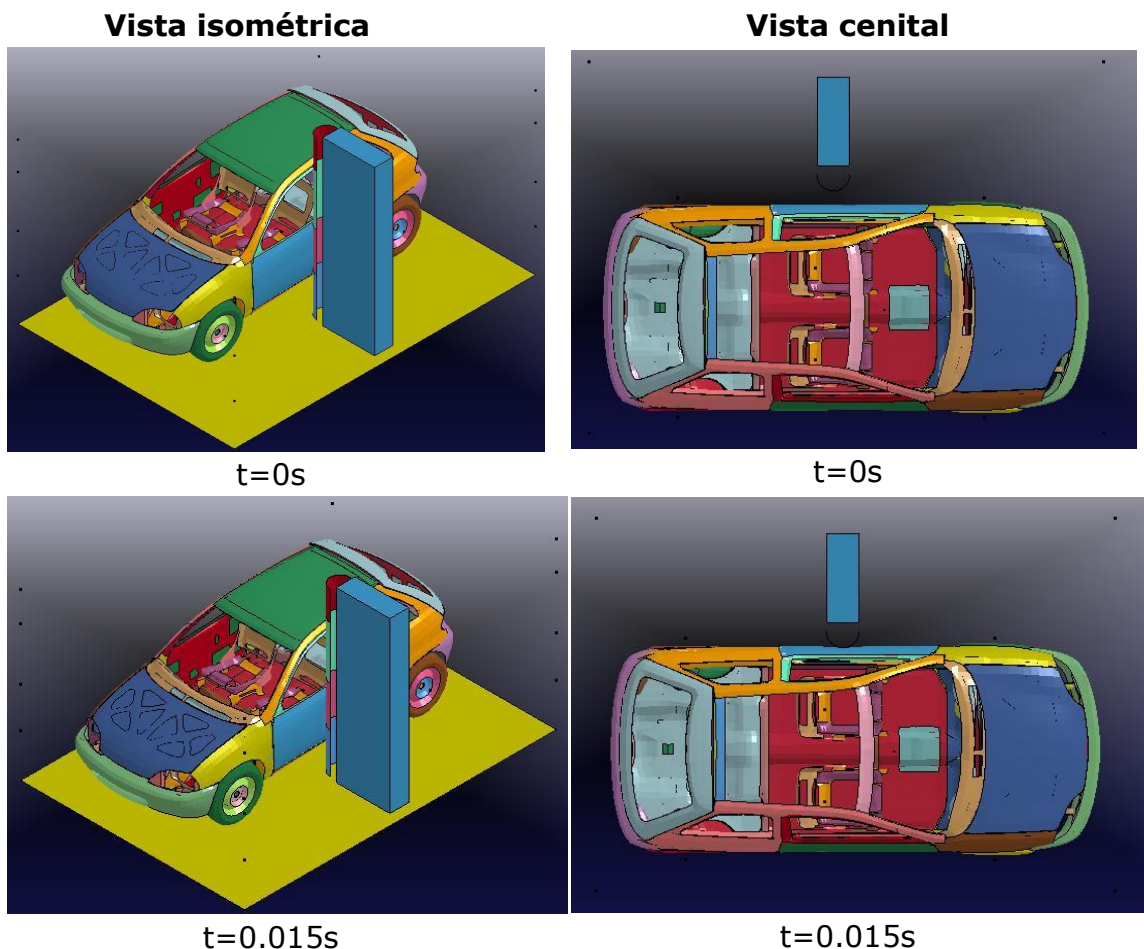
Figura 8. 4 Energía interna en el vehículo. Impacto contra bodega.

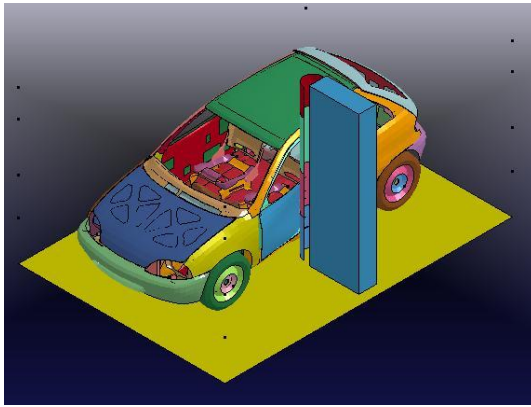
Esta energía es la que absorbe el coche a través de la deformación de la carrocería como consecuencia del impacto. Como se aprecia, alcanza un valor máximo de 45001 J en el instante $t=0,086$ s.

8.2. Impacto lateral contra un poste

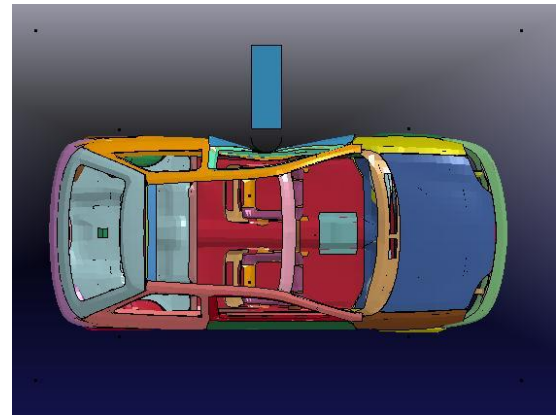
El ensayo contra el poste se realiza a menor velocidad que el lateral contra otro vehículo. Pese a ello, la deformación sufrida por el coche es mayor ya que la superficie contra la que impacta es sensiblemente menor que la de la barrera. En la tabla 8.2 se muestra la secuencia de imágenes correspondientes a las vistas isométrica y cenital.

Tabla 8. 2 Vista isométrica y cenital del exterior del vehículo en el ensayo lateral contra un poste.

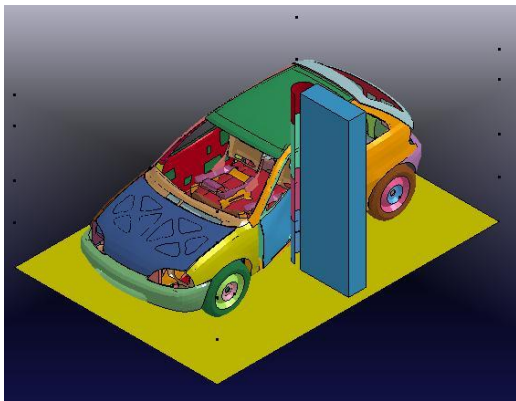




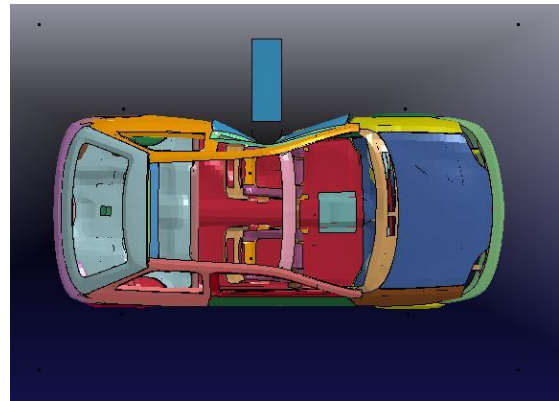
$t=0.03s$



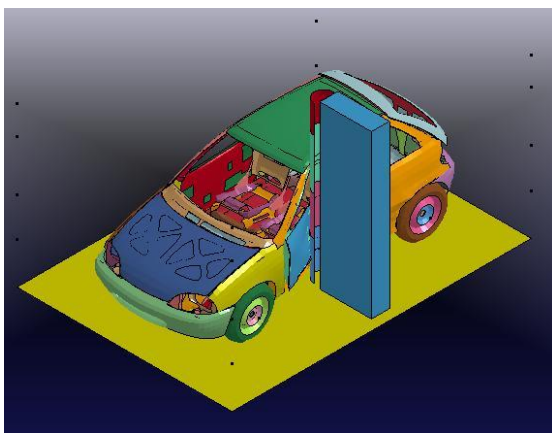
$t=0.03s$



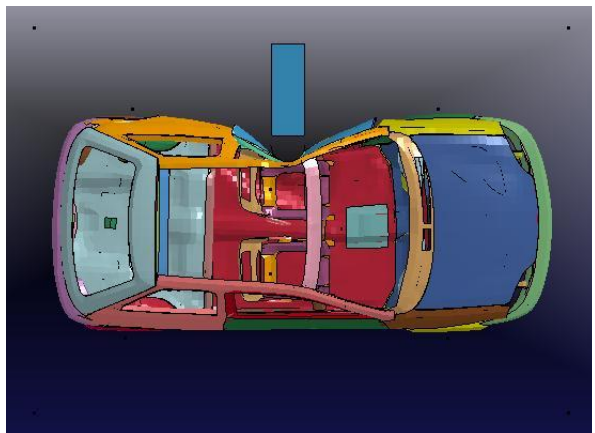
$t=0.045s$



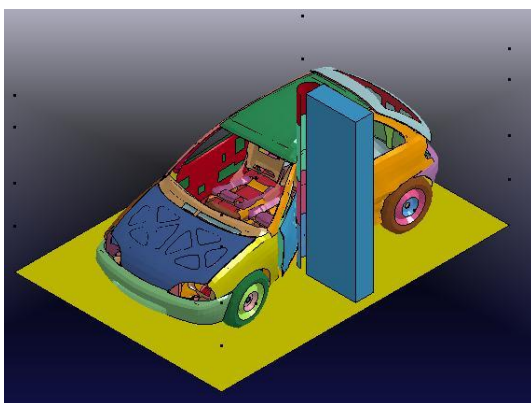
$t=0.045s$



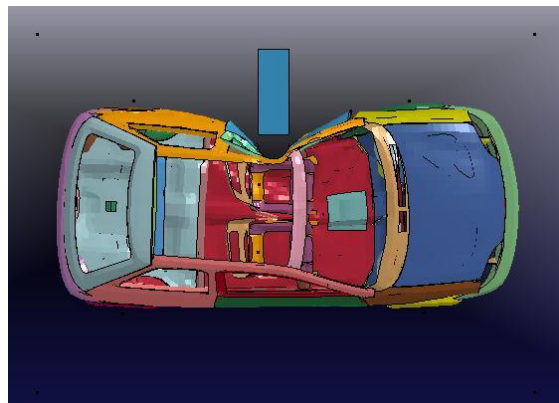
$t=0.06s$



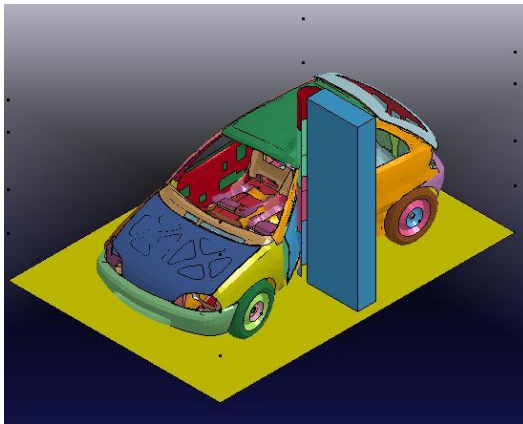
$t=0.06s$



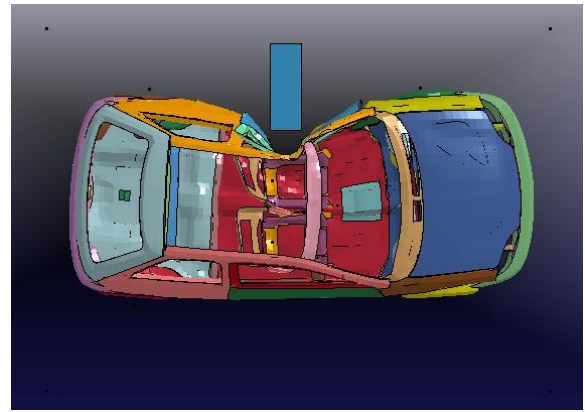
$t=0.075s$



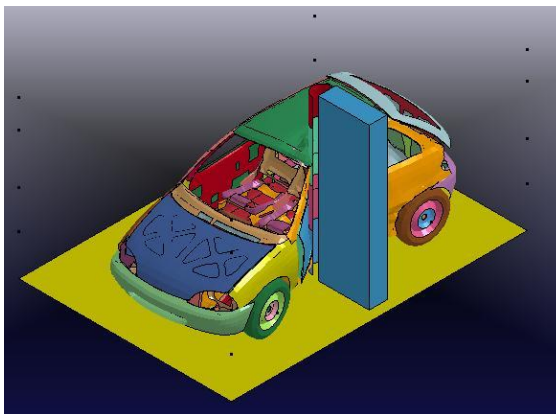
$t=0.075s$



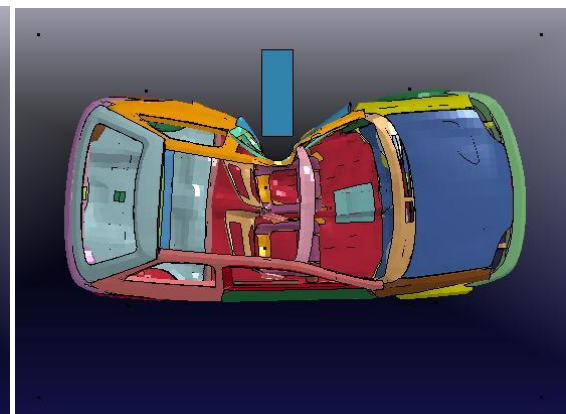
$t=0.09s$



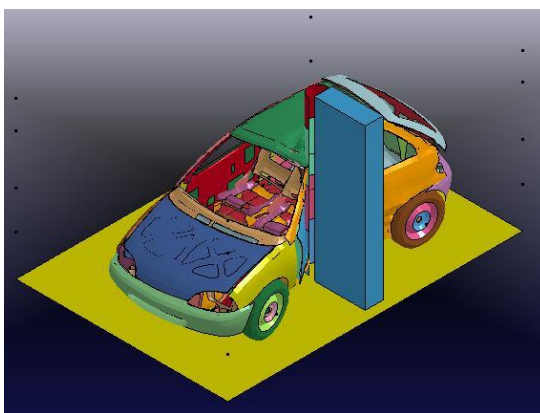
$t=0.09s$



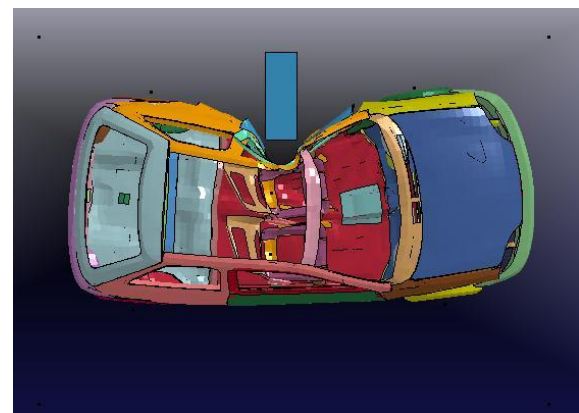
$t=0.105s$



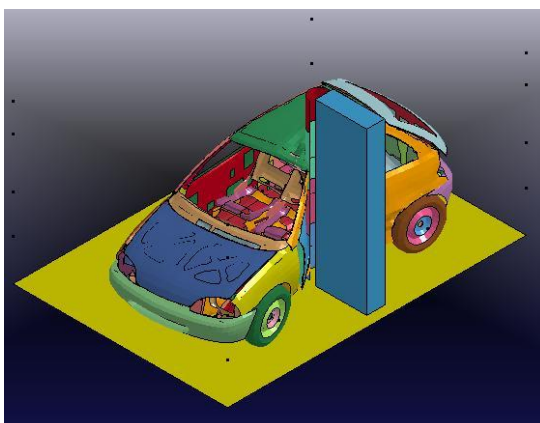
$t=0.105s$



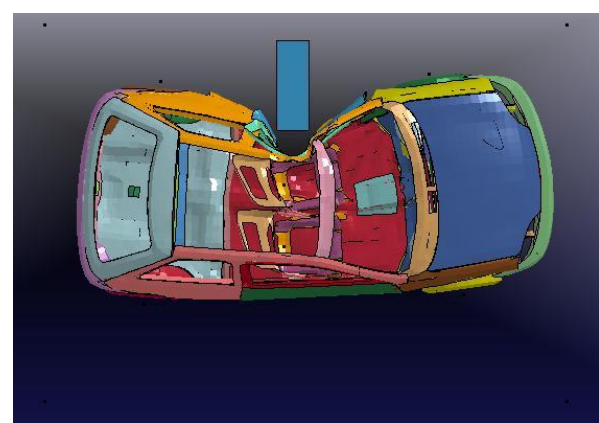
$t=0.12$



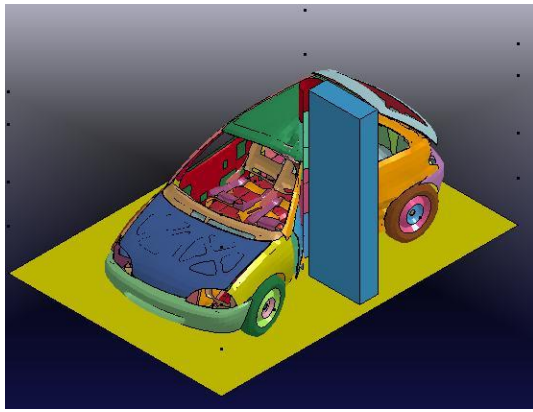
$t=0.12s$



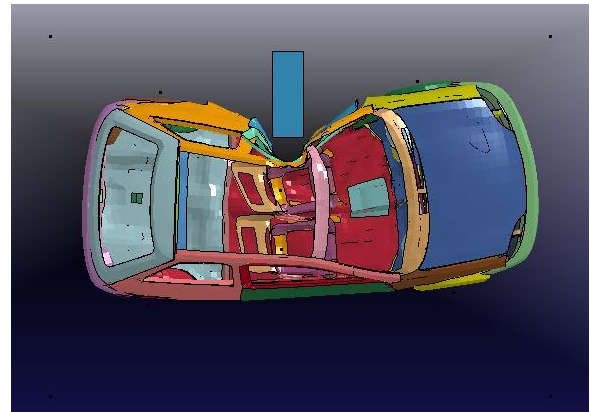
$t=0.135s$



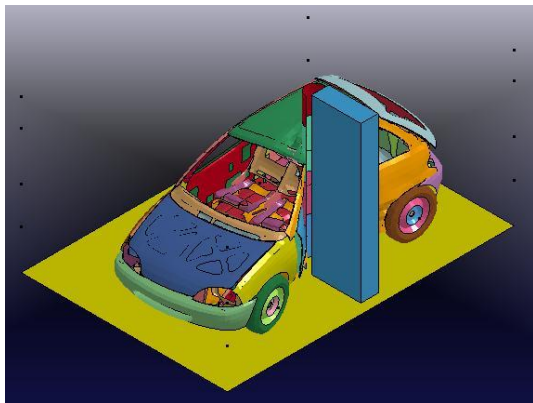
$t=0.135s$



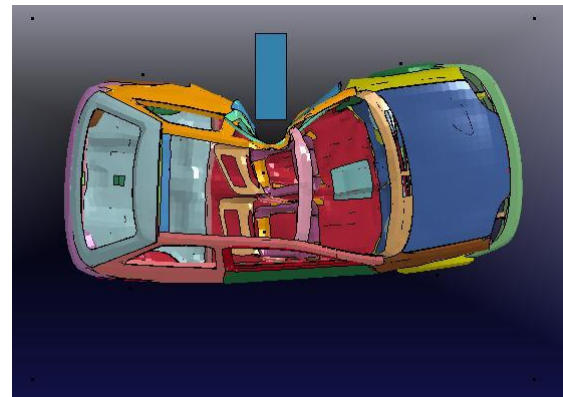
t=0.15s



t=0.15s



t=0.150001s



t=0.150001s

La figura 8.5 muestra resultados de aceleración resultante con valores filtrados a 1000 Hz.

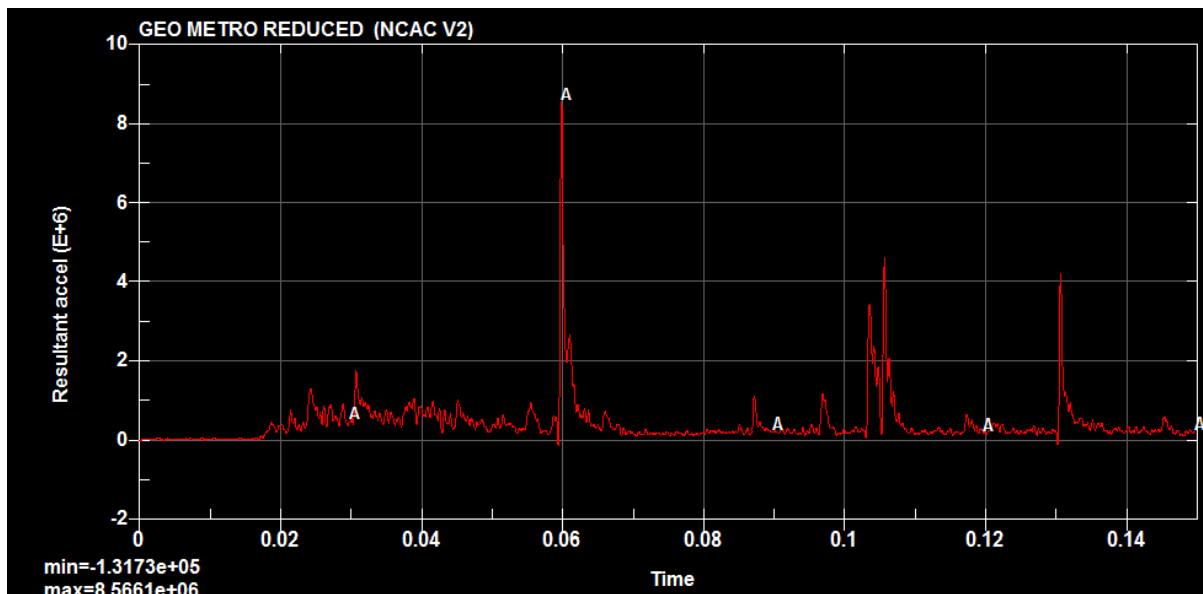


Figura 8. 5 Gráfica de aceleración resultante en el coche en el ensayo contra un poste.

En ella se observa cómo el valor máximo de aceleración corresponde a $8,5661 \cdot 10^6 \text{ mm/s}^2$, o $8566,1 \text{ m/s}^2$. En g esta aceleración toma un valor de 873,49 g. Dicha aceleración máxima tiene lugar en el instante $t=0,0599 \text{ s}$.

Por otro lado se obtiene la gráfica correspondiente a la deformación del muelle situado entre las puertas. La gráfica de muestra en la figura 8.6.

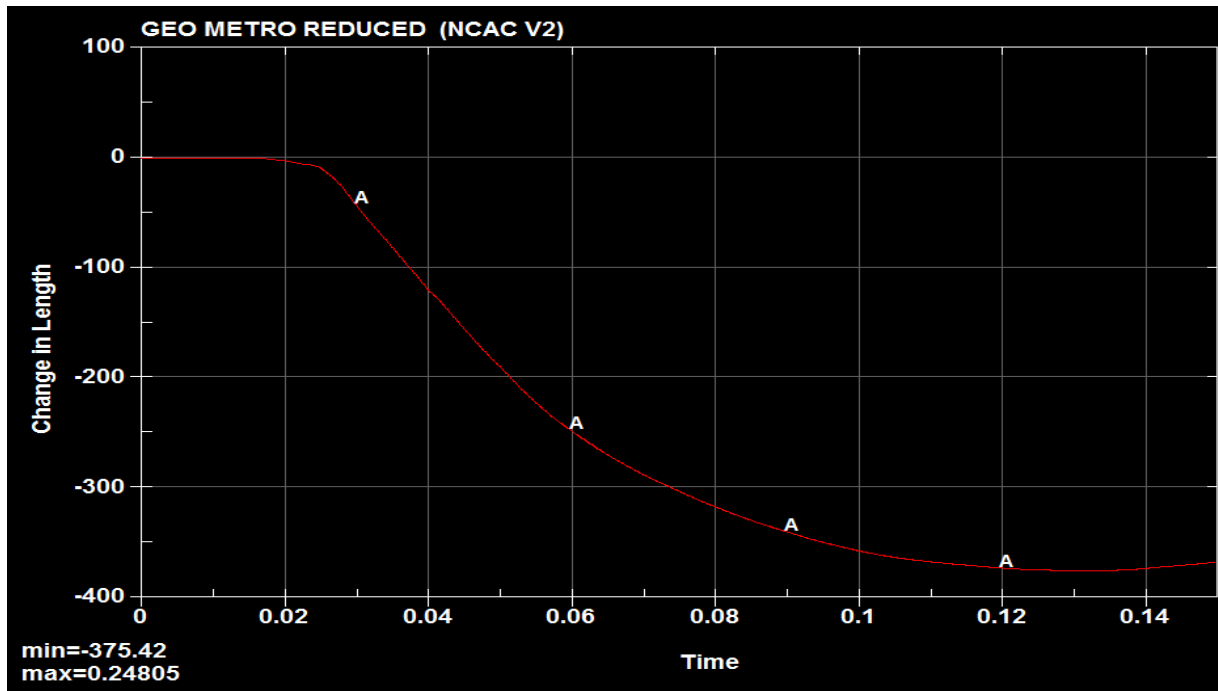


Figura 8. 6 Compresión del muelle. Impacto contra poste.

Como se observa, el valor máximo de compresión en este segundo caso es de 375,42 mm. Dicha compresión máxima se produce en el instante $t=0,132 \text{ s}$.

La figura 8.7 muestra la evolución temporal de la energía cinética del problema.

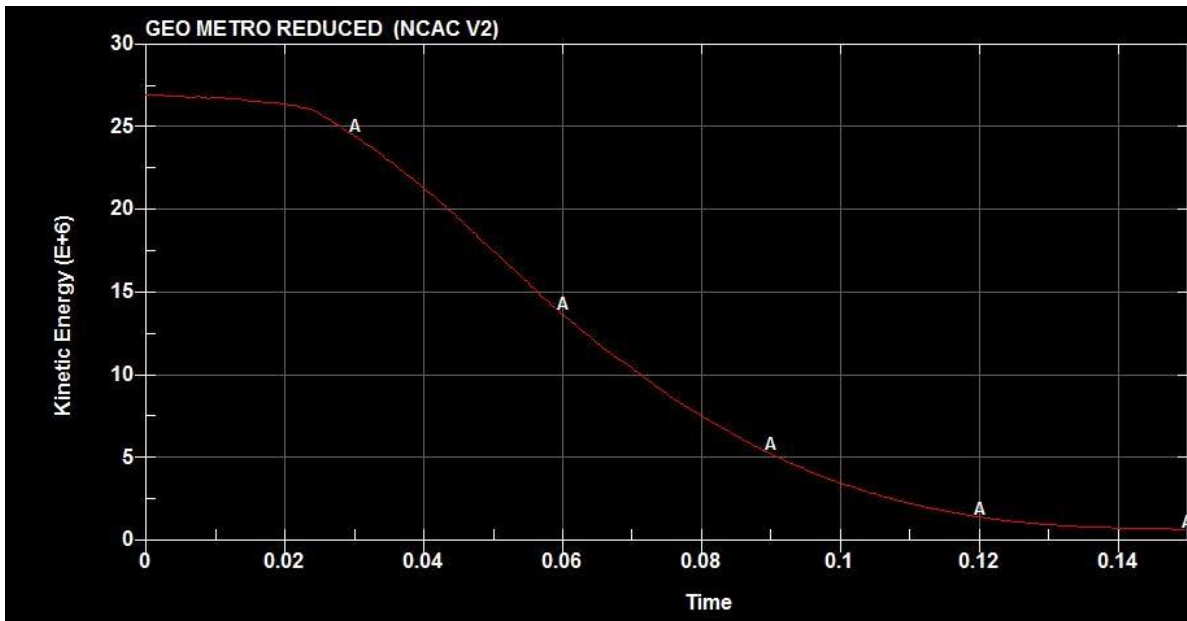


Figura 8. 7 Energía cinética en el vehículo. Ensayo contra poste.

Se puede apreciar cómo la energía inicial del vehículo es de 27023 J en unidades del sistema internacional. La energía cinética máxima tiene lugar en el instante inicial $t=0$ s.

Finalmente se muestra la figura 8.8 con la evolución temporal de la energía absorbida por el vehículo.

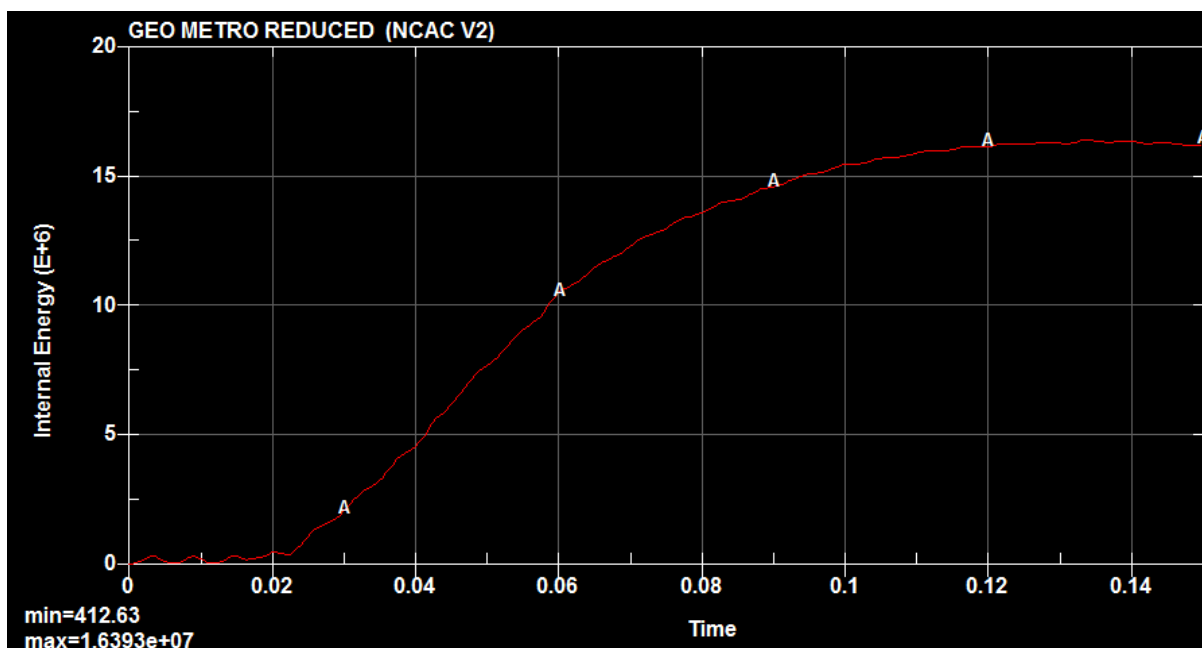


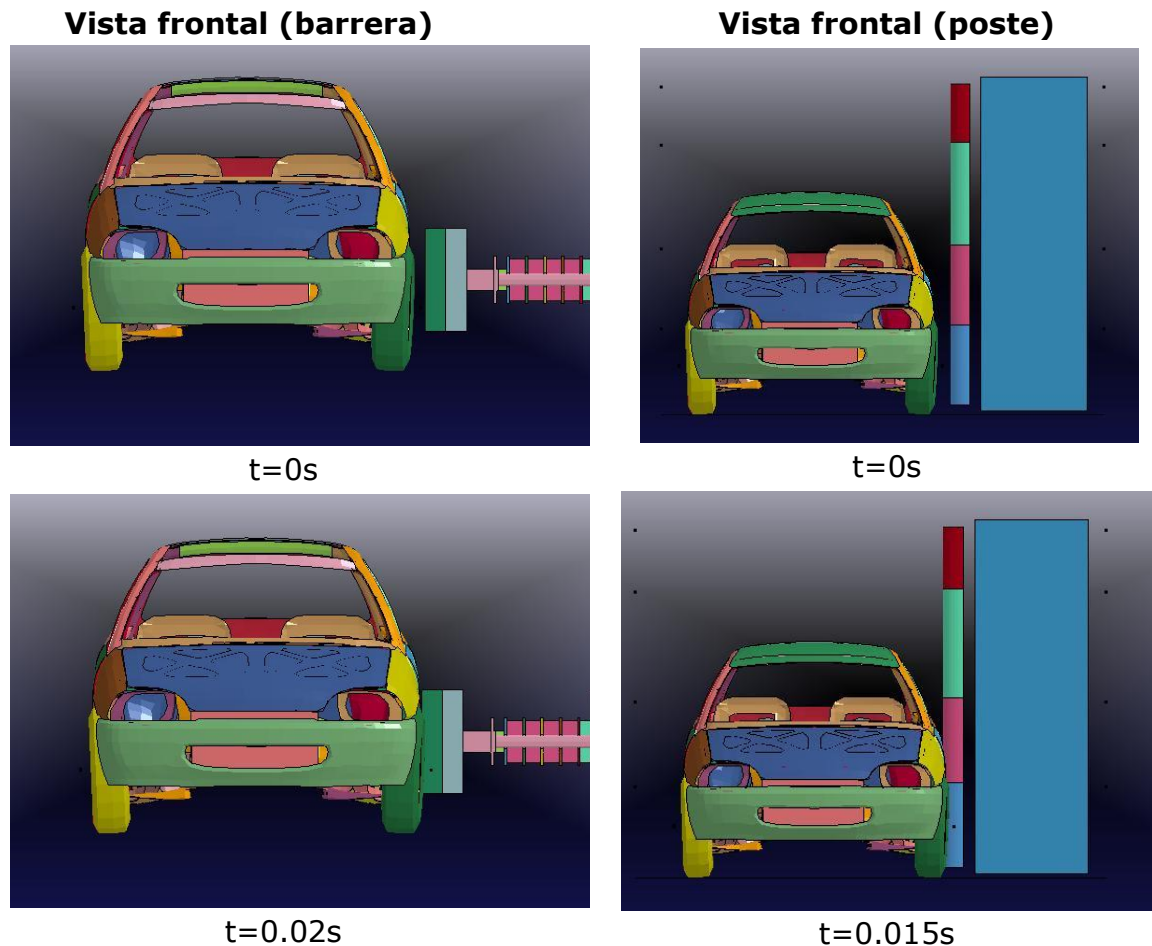
Figura 8. 8 Energía interna en el vehículo. Ensayo contra poste.

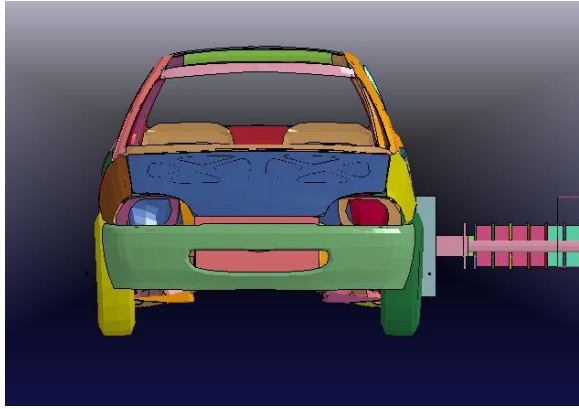
Esta energía alcanza un valor máximo de 16393 J en el instante $t=0,132$ s.

8.3. Comparación entre ambos ensayos

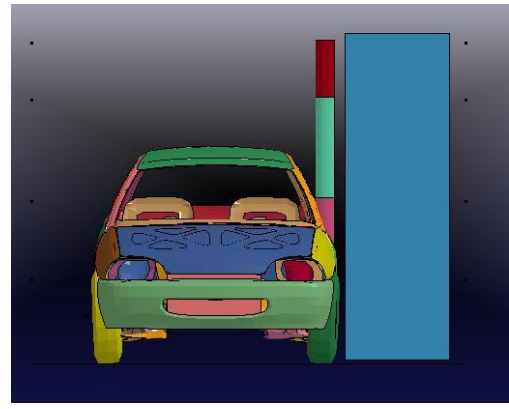
Para poder comparar simultáneamente las simulaciones, se muestra en la tabla 8.7 una comparativa entre las vistas frontales de los dos ensayos.

Tabla 8.3 Comparativa entre ambos ensayos.

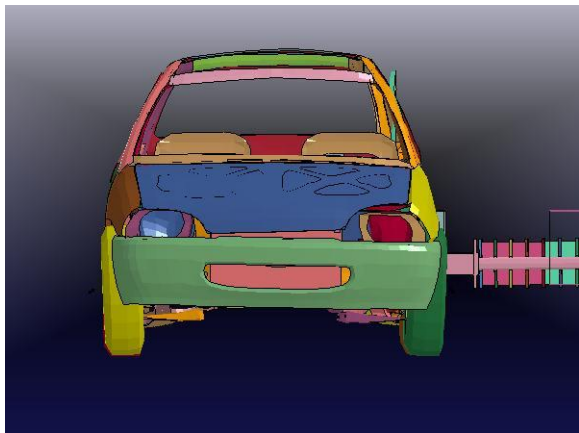




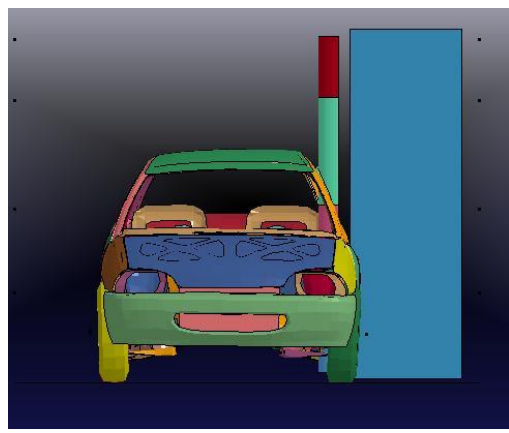
$t=0.03s$



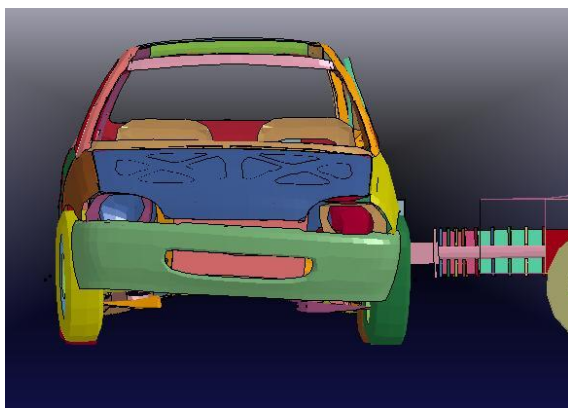
$t=0.03s$



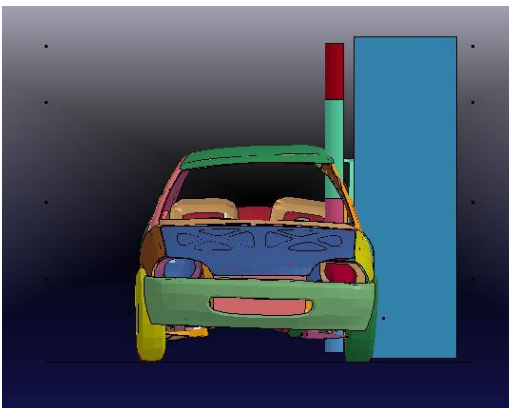
$t=0.04s$



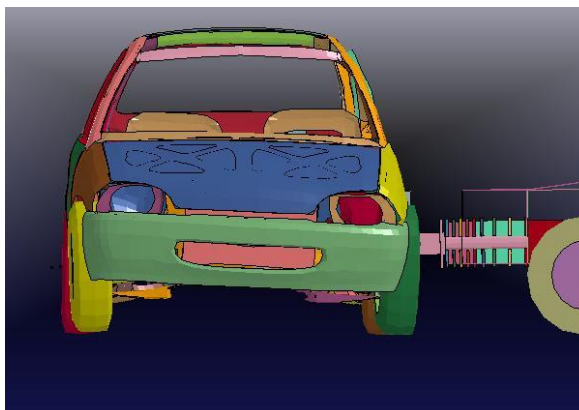
$t=0.045s$



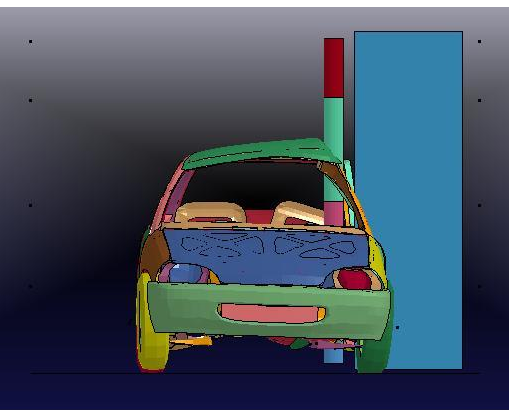
$t=0.05s$



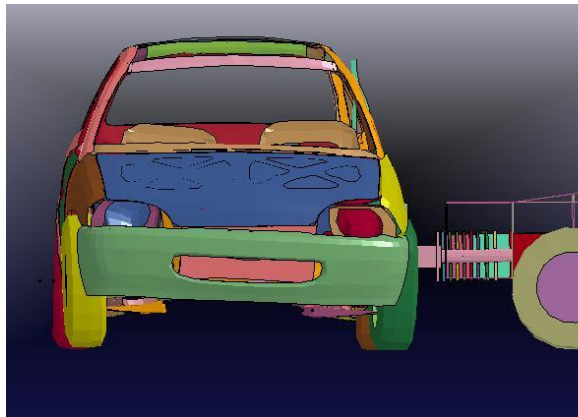
$t=0.06s$



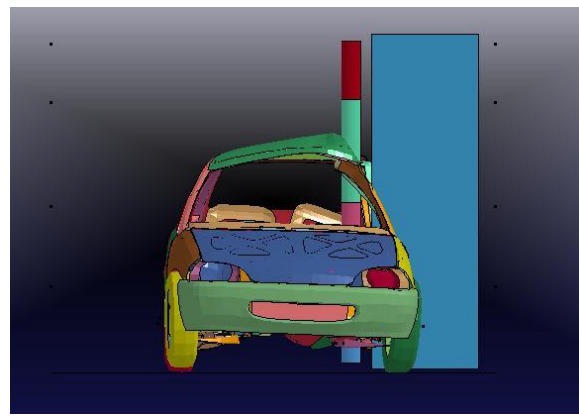
$t=0.06s$



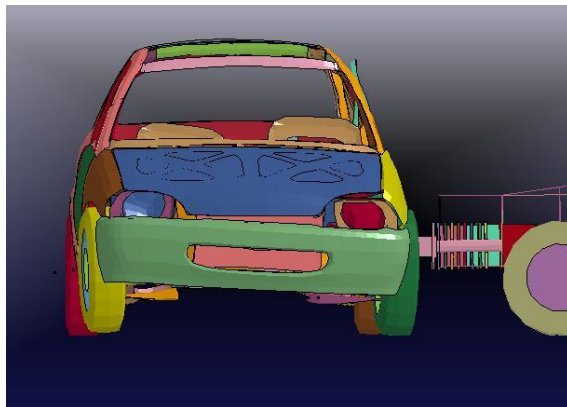
$t=0.075s$



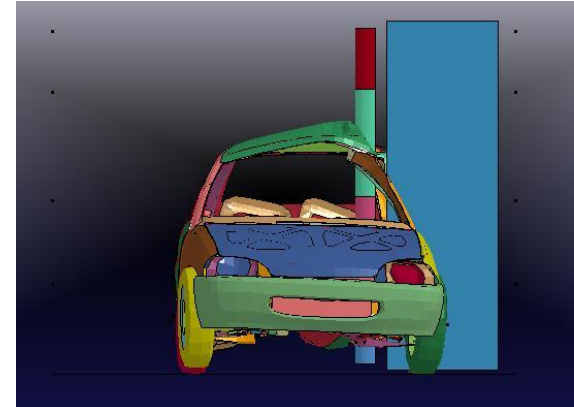
$t=0.07s$



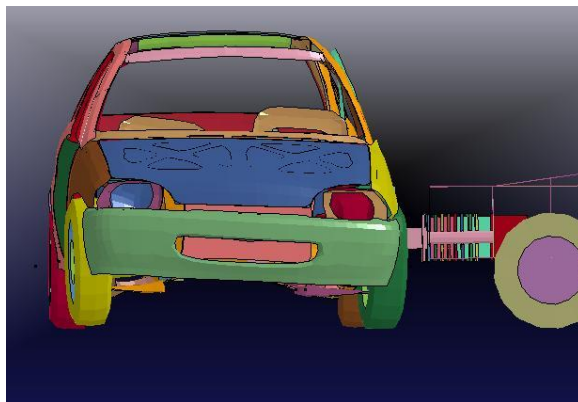
$t=0.09s$



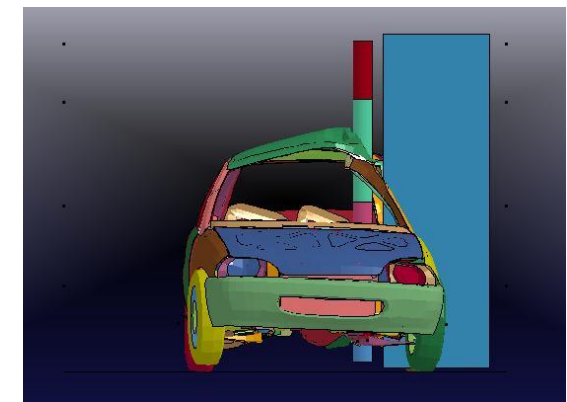
$t=0.08s$



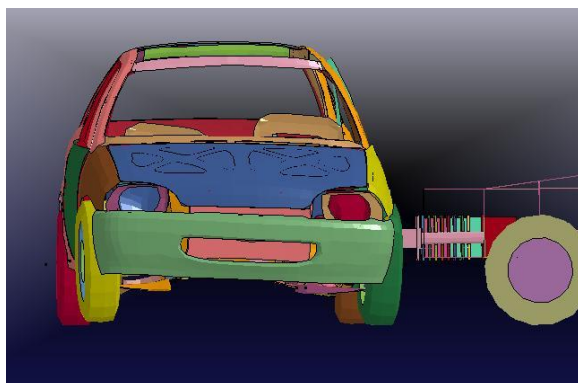
$t=0.105s$



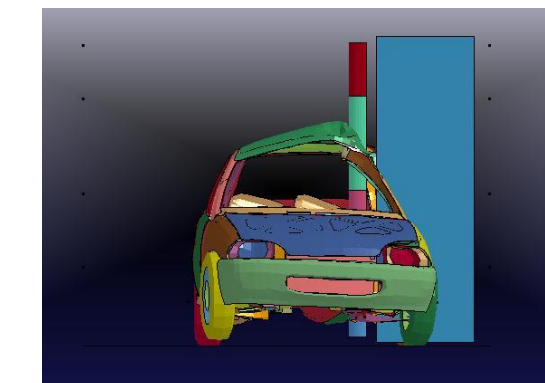
$t=0.09$



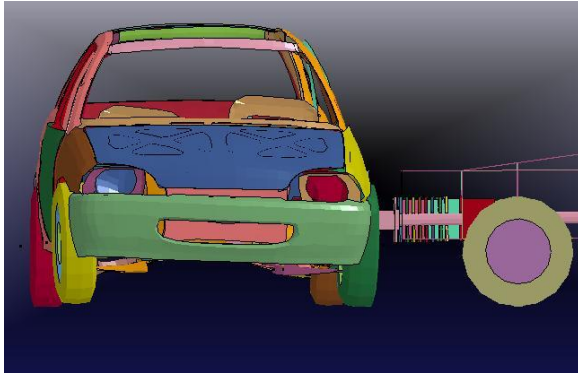
$t=0.12s$



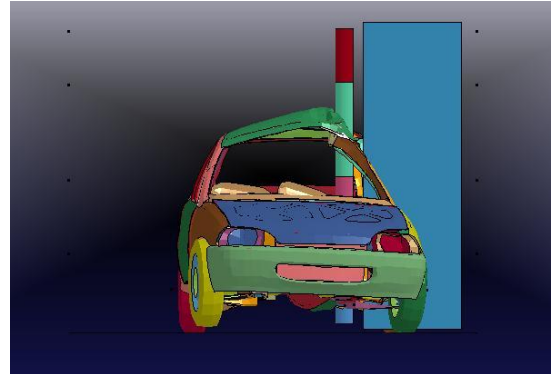
$t=0.10s$



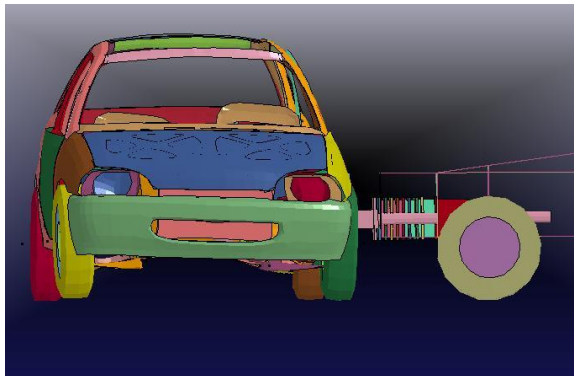
$t=0.135s$



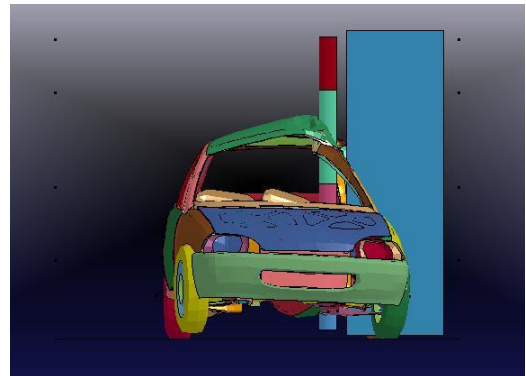
$t=0.11s$



$t=0.15s$



$t=0.12s$



$t=0.150001s$

9 CONCLUSIONES **Y TRABAJOS** **FUTUROS**

Este tema consta de dos apartados. En el primero, conclusiones, se analizan los resultados obtenidos en el apartado anterior y se extraen conclusiones relevantes acerca de los dos ensayos simulados. En el segundo apartado, trabajos futuros, se proponen nuevos proyectos que tomen como base de partida el presente.

9.1. Conclusiones

A la vista de las secuencias anteriores es posible apreciar que la mayor deformación se produce en el segundo caso, el correspondiente al ensayo contra el poste. Como ya se ha explicado, esto es debido a la menor superficie de impacto.

En concreto, y atendiendo a los resultados obtenidos en las gráficas del tema anterior, las deformaciones son 114,93 mm en el primer caso y 375,42 mm en el segundo.

Esta diferencia supone que en el ensayo contra el poste, la puerta del vehículo penetra 260,49 mm más en el interior del mismo. En este caso el impacto producido contra el *dummy* conllevará presumiblemente mayores daños.

Por otro lado, tras analizar las gráficas de aceleración se obtiene que la máxima aceleraciones mayor en el caso de impacto contra el *bogie*. En concreto los valores son $1,0077 \cdot 10^7$ mm/s² del primer caso frente a $8,5661 \cdot 10^6$ mm/s² del impacto contra el poste.

La diferencia de aceleraciones es de $1,5109 \cdot 10^6$ mm/s². Esta variación del 17% es pequeña teniendo en cuenta que las velocidades iniciales si son sensiblemente distintas, 50 km/h frente a 29 km/h (72%).

No supone una gran diferencia de aceleraciones si se tiene en cuenta que las velocidades iniciales son mucho más dispares. La explicación a esto se encuentra en la energía disipada.

Mientras que en ensayo contra el *bogie* existen dos elementos capaces de absorber energía (el coche y la barrera deformable), en el ensayo contra el poste sólo existe uno (el coche), ya que el poste es rígido.

Por tanto es la barrera deformable la causante de que la aceleración sufrida por el coche no sea mucho más elevada.

En este caso, pese a que las aceleraciones medidas en el coche en ambos casos sean del mismo orden, en el ensayo contra el poste el vehículo sufre una mayor deformación. Esto se traduce en que si un *dummy* estuviera en el asiento del conductor, el riesgo de lesión sería mayor en el caso de ensayo contra el poste ya que existe la posibilidad de que la cabeza golpee directamente contra el poste, ya que el vehículo carece de airbag lateral.

La energía absorbida en el ensayo contra el *bogie* es de 45001 J. Esta energía es mayor que la energía absorbida en el ensayo contra el poste (16393 J). Esto se debe a que la energía cinética en el primer ensayo es 99942 J, y es también mayor a la del segundo (27023 J).

Este proyecto ha avanzado en el estudio de los ensayos de choque simulados por ordenador. En él se han simulado dos ensayos distintos de choque, obteniendo datos de interés para el estudio de los accidentes, como la aceleración sufrida o la energía absorbida por el vehículo.

Para la elaboración del proyecto ha sido de un gran apoyo los anteriores proyectos realizados por anteriores alumnos de la Universidad Carlos III de Madrid sobre estos dos software utilizados, *LS-Dyna* y *LS-PrePost*. En concreto el ensayo de choque lateral de un vehículo contra otro vehículo se ha desarrollado a la vez que los ensayos de choque de Jesús

Sánchez Aguilera [27] y Andrés Alejandro Carrero Muñoz [28], quienes realizan la simulación de un choque lateral con un *dummy* situado en el interior del automóvil.

Las principales dificultades del proyecto se han encontrado a la hora de implementar los parámetros de las condiciones iniciales del ensayo. Las numerosas variables que intervienen en la definición de los contactos y las restricciones de movimiento hacen que sea necesario dedicar tiempo a definir las correctamente.

Aunque ya se ha tratado en apartados anteriores, LS-Dyna y su preprocesador y postprocesador LS-PrePost son unas herramientas con una gran capacidad de simulación. Prueba de ello son las figuras que se muestran a continuación, que muestran comparativas entre los ensayos de choque en modelos reales y en modelos simulados por ordenador.

En las figuras 9.1 y 9.2 se muestran comparaciones entre un modelo real y un archivo de LS-PrePost. En concreto se trata del modelado de un Ford Taurus, y se ha simulado un choque frontal descentrado en LS-DYNA. Como se puede apreciar, la simulación en LS-PrePost refleja fielmente el mismo ensayo llevado a cabo en la realidad.

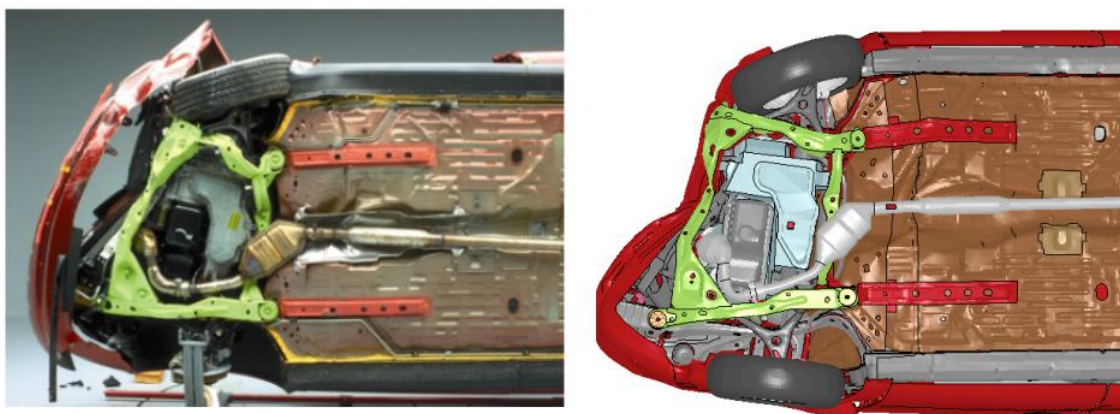


Figura 9. 1 Vista inferior de la comparativa entre el modelo real y el simulado.

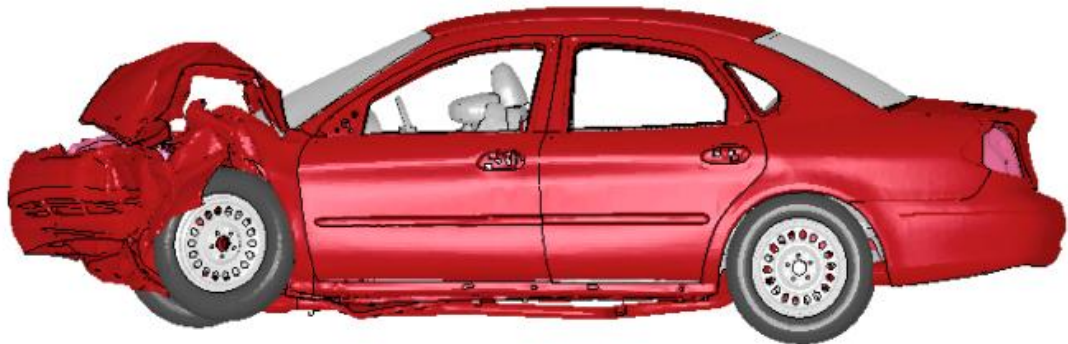


Figura 9. 2 Vista lateral de la comparativa entre el modelo real y el simulado.

Por otro lado, en este proyecto se ha demostrado que aunque los dos ensayos estudiados producen una aceleración similar en el vehículo, el ensayo del poste entraña un peligro mucho mayor para el conductor ya que existe el riesgo de que su cabeza golpee violentamente contra el poste. Esto es consecuencia de la deformación significativamente mayor que sufre en la zona en la que recibe el impacto.

9.2. Trabajos futuros

Este proyecto supone una oportunidad para, en ocasiones futuras, seguir desarrollando la simulación del ensayo. El siguiente paso podría ser incluir un *dummy* para ensayo lateral en los dos ensayos. Una vez incluido el *dummy* se podrían medir valores como el HIC o la deformación de las

costillas, para determinar con exactitud las lesiones que producen sobre el *dummy*.

Un siguiente proyecto podría consistir en incluir en el diseño un cinturón de seguridad para probar la eficacia del mismo en este tipo de ensayos, o incluso se podría plantear la inclusión de un airbag lateral para evitar el impacto que presumiblemente se producirá entre la cabeza y el poste.

10 REFERENCIAS

- [1] "Anuario estadístico de accidentes". DGT. 2009
- [2] "Anuario Estadístico General. 2009". DGT. 2009
- [3] NCAC: <http://www.ncac.gwu.edu/> (18/10/2011).
- [4] "Mecánica del Automóvil". Jesús Martín Calvo.
- [5] "Seguridad activa." - http://www.seguridad-vial.net/sistemas_seguridad.asp?sist=1 (18/10/2011).
- [6] Mecánica virtual: <http://www.mecanicavirtual.com.ar/> (18/10/2011).
- [7] Artículo de la DGT: "Seguridad activa".
<http://www.dgt.es/revista/num150/pages/seguridadactiva.html>
(18/10/2011).
- [8] "Seguridad Pasiva. Elementos básicos."
<http://www.todomecanica.com> (18/10/2011).
- [9] Artículo de la DGT: "ESTRUCTURA: El elemento de seguridad pasiva más importante". - <http://www.dgt.es/revista/archivo/pdf/num144-Dossier%20I-VIII.pdf> (18/10/2011).
- [10] "Elementos estructurales del vehículo". Cesvimap.
- [11] "Elementos estructurales del vehículo". Eduardo Águeda Casado. Paraninfo. 2009.
- [12] "El habitáculo de seguridad". Santiago L. de Soria. Centro-Zaragoza. Julio 2000.

- [13] "Estructuras del vehículo". Tomas Gómez Morales. Paraninfo. Madrid 2004.
- [14] "Mecánica del Automóvil II". William Harry Crouse. Boixareu Editores. 1993.
- [15] Centro Tecnológico de Automoción de Galicia. - <http://www.ctag.com/> (18/10/2011).
- [16] "Asientos: Confort y seguridad". Federico Carrera Salvador. Revista Cesvimap 61. Septiembre 2007.
- [17] "The Evolution of the Crash Test Dummy". <http://www.autoevolution.com/news/the-evolution-of-the-crash-test-dummy-21066.html> (18/10/2011).
- [18] INTA: <http://www.inta.es/> (18/10/2011).
- [19] EuroNCAP: www.euroncap.com (18/10/2011).
- [20] "Simulación de un choque frontal de un vehículo automóvil contra diferentes tipos de barrera". David Illescas Pérez. Proyecto de fin de carrera. Universidad Carlos III de Madrid. Octubre 2009.
- [21] "Una introducción al método de los elementos finitos". <http://www.ehu.es/~mepvaarf/rnupde/femelipticos.pdf> (18/10/2011).
- [22] "Introducción al método de los elementos finitos". A. Carnicero.
- [23] "Contact modeling in Ls-Dyna" - www.dynasupport.com (18/10/2011).
- [24] "LS-DYNA. Keyword user's manual". Livermore Software Technology Corporation.
- [25] "POLE SIDE IMPACT TESTING PROTOCOL". EuroNCAP. *Version 5.1*. Junio 2011.
- [26] "Fundamentos físicos y su aplicación en la reconstrucción de accidentes de tráfico". - <http://www.mapfre.com/ccm/content/documentos/cesvimap/ficheros/MRATEExtracto.pdf> (18/10/2011).
- [27] "Simulación de un choque lateral con *dummy* sin cinturón". Jesús Sánchez Aguilera. Proyecto de fin de carrera. Universidad Carlos III de Madrid. Octubre 2011

- [28] "Simulación de un choque lateral con *dummy* con cinturón". Andrés Alejandro Carrero Muñoz. Proyecto de fin de carrera. Universidad Carlos III de Madrid. Octubre 2011

